

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

課題名2-2006: メタン吸収能を含めたアジア域の森林における土壌炭素動態
の統括的観測に基づいた気候変動影響の将来予測

(JPMEERF20202006)

令和2年度～令和4年度

Evaluation and Future Prediction of the Effect of Climate Change on Asian Forest Soil Carbon Dynamics Based
on a Comprehensive Field Study

<研究代表機関>

国立研究開発法人国立環境研究所

<研究分担機関>

北海道大学

弘前大学

宮崎大学

鳥取大学

千葉大学

国際農林水産業研究センター

日本原子力研究開発機構

<研究協力機関>

国立台湾大学

香港中文大学

中国科学院西双版纳热带植物园

マレーシア森林研究所

令和5年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 長期的な温暖化操作実験及び CH ₄ /CO ₂ フラックスの同時連続観測による土壌炭素動態に対する気候変動影響の定量化	20
(国立研究開発法人国立環境研究所)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 長期的観測データに基づいたアジア森林土壌におけるCH ₄ /CO ₂ フラックスの広域推定と将来予測	35
(千葉大学)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細	50
IV. 英文Abstract	57

I. 成果の概要

課題名 2-2006 メタン吸収能を含めたアジア域の森林における土壌炭素動態の統括的観測に基づいた気候変動影響の将来予測

課題代表者名 梁 乃申（国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域 炭素循環研究室 室長）

重点課題 主：【重点課題⑨】地球温暖化現象の解明・予測・対策評価

副：【重点課題⑧】気候変動への適応に係る研究・技術開発

行政要請研究テーマ（行政ニーズ）

（2-3）メタンの排出削減による統合的な温暖化抑制効果の評価と対策オプションの検討

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

研究経費

110,656千円（合計額）

（令和2年度：39,520千円、令和3年度35,568千円、令和4年度：35,568千円）

研究体制

（サブテーマ1）長期的な温暖化操作実験及びCH₄/CO₂フラックスの同時連続観測による土壌炭素動態に対する気候変動影響の定量化（国立研究開発法人国立環境研究所）

- | | |
|------------------------------|--------|
| ① 国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域/室長 | 梁 乃申 |
| ② 国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域/室長 | 高橋 善幸 |
| ③ 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター/教授 | 高木 健太郎 |
| ④ 北海道大学大学院農学研究院/教授 | 平野 高司 |
| ⑤ 弘前大学大学院理工学研究科/准教授 | 石田 祐宣 |
| ⑥ 宮崎大学農学部/教授 | 高木 正博 |
| ⑦ 鳥取大学乾燥地研究センター/助教 | 寺本 宗正 |

（サブテーマ2）長期的観測データに基づいたアジア森林土壌におけるCH₄/CO₂フラックスの広域推定と将来予測（千葉大学）

- | | |
|--|--------|
| ⑧ 千葉大学環境リモートセンシング研究センター/教授 | 市井 和仁 |
| ⑨ 国際農林水産業研究センター生物資源・利用領域/主任研究員 | 近藤 俊明 |
| ⑩ 日本原子力研究開発機構原子力科学研究部門原子力基礎工学研究センター/研究主席 | 小嵐 淳 |
| ⑪ 日本原子力研究開発機構原子力科学研究部門原子力基礎工学研究センター/研究主幹 | 安藤 麻里子 |

研究協力機関

- | | |
|---------------------------------|------------------|
| ⑫ 国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域/特別研究員 | 孫 力飛 |
| ⑬ 国立台湾大学演習林/准教授 | Po-Neng Chiang |
| ⑭ 香港中文大学/准教授 | Derrick Y.F. Lai |
| ⑮ 中国科学院中国科学院西双版纳热带植物园/研究員 | Yiping Zhang |
| ⑯ マレーシア森林研究所（FRIM）/研究員 | Azian Mohti |

本研究のキーワード：メタン、温暖化操作実験、広域推定、土壌微生物、土壌放射性炭素（¹⁴C）

1. はじめに（研究背景等）

欧米に比べ、有機炭素が豊富な日本を含むアジアモンスーン地域の森林土壌は、温暖化に対する長期的なCO₂排出量（微生物呼吸）増進の応答が大きいことに加え、温暖化に伴う土壌の乾燥化でCH₄吸収能が上昇する可能性も、土壌の劣化でCH₄吸収能が低下する可能性も秘めている。しかし、CH₄を含めた土壌炭素動態の気候変動応答に関わる観測データの欠如は、将来予測の大きな不確実性の一因となっている。

アジア域の森林土壌におけるCH₄吸収能に関する多地点連続観測、広域推定及び将来予測を行うために、国立環境研究所が開発した世界最大規模のチャンバー観測ネットワークを活用し、気候変動に対するCH₄吸収の応答メカニズムを明らかにすることは炭素循環の将来予測の精緻化に大きく貢献するものである。

2. 研究開発目的

本研究では、森林土壌の炭素蓄積能やCH₄吸収能に対する気候変動の影響について日本を含むアジア域で総合的に評価するために、北海道からマレーシアまでの広域トランゼクトに沿って選定した代表的な森林生態系を対象に（1）メタン吸収速度（CH₄フラックス）の連続観測を新規に10~12ヶ所で展開し、世界的に貴重な森林土壌のCH₄フラックスに関する長期連続観測データを得る；（2）温暖化操作実験に対する土壌炭素貯留量の変動に関する新たなデータセットを構築する；（3）放射性炭素（¹⁴C）同位体比や微生物群集構造の分析により、土壌炭素動態の長期的な温暖化応答メカニズムを解明する；（4）土壌呼吸の観測をより長期化し、短期的な気候変動や極端気象、土地利用変化、森林施業などの影響を定量的に検出する；（5）得られた観測データに基づき、機械学習や経験モデル等の複数のアプローチを検証しながら活用し、アジアの森林域における土壌CH₄/CO₂フラックスの超高解像な広域推定と将来予測を行う。本研究の研究成果によって、パリ協定やSDGsの目標達成のために、土壌炭素貯留量やCH₄吸収能の維持及び強化を考慮した緩和策と適応策の策定に資する科学的根拠を提供する。

3. 研究目標

全体目標	本研究では、北海道最北端から赤道付近のマレーシアまでのアジアにおける広域トランゼクトに沿って、代表的な森林生態系で土壌温暖化操作実験を行うとともに、土壌CH ₄ /CO ₂ フラックスやそれに関係する土壌微生物、 ¹⁴ Cに関する包括的な観測、分析を行う。本研究の最終目標は、我々が実施する統一的な観測、分析データに基づき、機械学習など複数のモデルを用いて、アジア域の森林の土壌CH ₄ /CO ₂ フラックスに関する1 kmメッシュの超高解像な広域推定を行うとともに、土壌有機炭素貯留量やCH ₄ 吸収能に対する気候変動影響の将来予測を行うことである。
サブテーマ1	長期的な温暖化操作実験及びCH ₄ /CO ₂ フラックスの同時連続観測による土壌炭素動態に対する気候変動影響の定量化
サブテーマリーダー/所属機関	梁 乃申／国立環境研究所
目標	本サブテーマでは、観測データの不足しているアジアモンスーン地域において、世界最大規模のチャンバー観測ネットワーク（国内8ヶ所、海外12ヶ所）を用いて、土壌CH ₄ /CO ₂ フラックスの地域差および生態系による差を明らかにすることに加え、気候変動や攪乱の影響評価を行うことを目標とする。具体的には、温暖化操作実験をこれまでデータ集積のなかった熱帯林まで拡大するとともに、温暖

	化操作実験サイトを中心とした10~12ヶ所の森林における土壌呼吸自動連続観測システムに、CH₄濃度の連続測定が可能な分析計を導入することで、世界的に前例のない、生態系毎または地域毎の土壌CH₄吸収能の定量的な評価を行う。また、本研究を実施することで、得られた10~20年間におよび土壌呼吸の長期観測データを統一的なプロトコルで解析し、温暖化や気候変動に伴った極端現象（高温・乾燥）、台風（豪雨）、エルニーニョ現象、また森林施業（間伐・皆伐）や土地利用変化（天然林からプランテーションへの転換）などの人為的な活動が各生態系の土壌呼吸に与える影響評価を行う。さらに、統一されたプロトコルから得られた長期観測データセットをサブテーマ2に提供し、モデルによる広域推定及び将来予測の精緻化に貢献する。
--	--

サブテーマ2	長期的観測データに基づいたアジア森林土壌におけるCH₄/CO₂フラックスの広域推定と将来予測
サブテーマリーダー/所属機関	市井 和仁／千葉大学
目標	本サブテーマでは、サブテーマ1が構築したプラットフォーム及びデータセットを活用し、土壌CH₄/CO₂フラックスの気候変動に対する長期的な応答メカニズムの解明と、それに基づく広域推定および将来予測を行うことを目標とする。具体的には、土壌微生物特性と土壌呼吸に由来する¹⁴Cの分析により、アジア域の森林における土壌呼吸量や土壌呼吸に対する温暖化影響と、微生物特性（バイオマス・種組成）および有機炭素分解特性（分解された有機炭素の年代等）との関係性を明らかにする。特に、温暖化処理前後の微生物と土壌呼吸に由来する¹⁴Cの変化量から、温暖化によってアジアモンスーン域の有機炭素分解が増進し、その増進効果が長期的に維持されるメカニズムの解明が可能となる。さらに、土壌CH₄フラックスに関わるCH₄分解菌・生成菌の分析によって、CH₄の吸収速度と土壌構造（孔隙率や有機炭素含有量）や環境因子（特に土壌水分）、生物因子（優占樹種）などとの関係性が解明できる。これらの知見を基に、サブテーマ1の観測ネットワークにおける土壌CH₄/CO₂フラックスを説明する関係式を構築する。開発された関係式やその他衛星観測データなどに基づき、アジア域における森林土壌CH₄/CO₂フラックスの広域推定および将来予測を行う。 加えて、海外の12ヶ所（計4カ国（地区））における研究体制の維持にあたっては、現地研究者のキャパシティ・ビルディングを行い、日本のアジア地域におけるイニシアティブを発揮し、将来的なデータ集積の効率化に貢献する。

4. 研究開発内容

【サブテーマ1】長期的な温暖化操作実験及びCH₄/CO₂フラックスの同時連続観測による土壌炭素動態に対する気候変動影響の定量化

(1) 温暖化操作実験による土壌CH₄/CO₂フラックスの温暖化影響及びフィードバック効果の定量評価

(1-1) 観測サイトの概要

(1-1-1) 温暖化操作実験サイト

国内5ヶ所及び海外2ヶ所の温暖化操作実験サイトに設置されたチャンバーシステムを改良・整備することで、チャンバー観測ネットワークによる土壌呼吸を中心としたアジアの代表的な森林における炭素

蓄積機能に関する観測体制を確立した。また、同様のプロトコルで香港（亜熱帯林）・台湾（熱帯林）・マレーシア（熱帯林）の3ヶ所で、新たな温暖化操作実験を展開した（図-0.1）。また、土壌呼吸自動連続観測システムに、 CH_4 濃度の連続測定が可能な分析計を導入することで、世界的に前例のない、森林生態系毎または地域毎の土壌 CH_4 吸収量の定量的な評価を行った。

- 1) 最北端針広混交林（天塩温暖化）：北海道大学天塩研究林における、約40年生の針広混交林（北海道天塩郡幌延町字間寒別、44°55' N、142°01' E、標高20 m）を調査地とした。
- 2) 東北地方冷温帯落葉広葉樹林（白神山地）：青森県西津軽郡西目屋村の白神山地にある、約80年生のミズナラ林（40°32' N、140°13' E、標高245 m）を調査地とした。
- 3) 関東地方衰退したアカマツ林（つくば）：茨城県つくば市の国立環境研究所敷地内の衰退したアカマツ林（36°3' N、140°7' E、標高23 m）を調査地とした。
- 4) 西日本常緑カシ林（広島）：東広島市鏡山の山頂付近に分布する常緑カシ林（34°24' N、132°43' E、標高320 m）を調査地とした。
- 5) 九州地方コジイ林（宮崎）：宮崎県宮崎市宮崎大学田野フィールドの約70年生常緑広葉樹二次林（コジイ林、31°51' N、131°18' E、標高130 m）を調査地とした。
- 6) 中国亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林（哀牢山）：中国雲南省景東県にある哀牢山自然保護区内の中国科学院哀牢山亜熱帯森林長期モニタリングサイト（24°32' N、101°01' E、標高2,480 m）を調査地とした。
- 7) 香港亜熱帯常緑広葉樹林（香港）：香港中文大学敷地内の亜熱帯常緑広葉樹二次林（22°25' N、114°12' E、標高23 m）を調査地とした。
- 8) 台湾熱帯常緑広葉樹林（台湾熱帯林）：国立台湾大学演習林が管轄する下坪熱帯植物園内の熱帯林（23°46' N、120°40' E、標高155 m）を新規調査地とした。
- 9) マレーシアオイルパームプランテーション（オイルパーム）：マレーシアオイルパームプランテーション（オイルパーム）：課題代表者らが参画するSATREPS課題「オイルパーム農園の持続的土地利用と再生を目指したオイルパーム古木への高付加価値化技術の開発」において整備を進める土壌炭素フラックス観測サイト（マレーシア半島部ネグリセンビラン州のオイルパームプランテーション：3°01' N、102°18' E、標高90m）において、技術支援を行うとともに、新たにチャンバーを増設し、観測を開始した。なお、本サイトは2022年9月にチャンバーシステムを設置し、12月に根切処理を行った。2023年2月に温暖化処理を開始したが、本報告書にはその短期間の観測データを省略した。



図-0.1. 台湾（熱帯林）およびマレーシア（オイルパームプランテーション）における温暖化操作実験サイトの設置および観測データのリアルタイム転送（クラウド）。

(1-1-2) 長期モニタリングサイト (図-0.2)

2-1705などの先行課題が開発・推進している世界最大規模のチャンバー観測ネットワークを利用して、北海道の最北端（北緯45°）から赤道付近のマレーシアまでの広域トランセクトに沿って、6つの森林生態系（国内3サイト・海外3サイトにおける土壌呼吸と微生物呼吸の長期連続測定を継続した。また、半数以上のサイト（国内3ヶ所、海外1ヶ所（マレーシア熱帯林））において、CH₄濃度の連続測定が可能な分析計を導入することで、得られた観測結果に基づいて気候変動や攪乱が森林生態系の土壌炭素放出に与える影響を定量的に評価した。

- 1) 天塩カラマツ植林（天塩フラックス）：北海道大学天塩研究林における、2003年に天然冷温帯針広混交林を皆伐した後に植林された若齢カラマツ植林地（45°03'N、142°06'E、標高66 m）を調査地とした。
- 2) 苫小牧カラマツ林台風跡地（苫小牧）：北海道苫小牧国有林におけるカラマツ林の台風跡地（42°44'N、141°31'E、標高125 m）を調査地とした。
- 3) 富士北麓カラマツ成熟林（富士）：富士北麓におけるカラマツ成熟林（35°26' N、138°45' E、標高1,100 m）を調査地とした。
- 4) 中国亜熱帯亜高山帯天然針葉樹林（麗江）：中国雲南省麗江市にある自然保護区内の天然針葉樹林（27°08' N、100°13' E、標高3,188 m）を調査地とした。
- 5) 台湾亜熱帯スギ林（台湾スギ林）：台湾大学附属溪頭演習林におけるスギ成熟林（23°40' N、120°48' E、標高1,250 m）を調査地とした。
- 6) マレーシア低地熱帯天然林（マレーシア熱帯林）：マレーシア半島部ネグリシンビラン州にあるパソ保護林内の低地熱帯天然林（2°58'N、102°18'E、標高100 m）を調査地とした。



図-0.2. 本研究で用いたチャンバー観測ネットワークのサイト分布

(1-2) 観測・解析方法

国内外の温暖化操作実験サイトにおいて既存の観測システムを維持、もしくは発展させて、連続的かつ5秒間隔の高解像度な観測データを得た。すべての観測サイトにおいて、2-1705などの先行課題で開発した大型（縦90×横90×高さ50 cm）マルチ自動開閉チャンバーシステムおよび赤外線ヒーターによる土壌昇温システムを用いて観測を行った。システムは15個のチャンバーとコントロールボックスからなる。コントロールボックスは、レーザー分光型CH₄/CO₂分析計（米国LI-COR社LI-7810、もしくは米国LGR社UGGAまたはカナダABB社MGGA）、データロガー（米国Campbell Scientific社CR1000）、電磁弁マニホールド、真空ポンプなどから構成されている。各チャンバーの蓋には圧縮空気で伸縮するシリンダーが取り付けられており、測定する際には蓋が自動で閉まるようにコントロール基板によって制御される。密閉されたチャンバー内のCH₄/CO₂濃度の変化は、データロガーに記録される。各チャンバーについて、密閉後のチャンバー内のCH₄/CO₂濃度を5秒間隔で数分間記録し、CH₄/CO₂フラックスの算出に用いた。根の呼吸の影響を排除した微生物呼吸速度を評価するチャンバーについては、チャンバーの外周土壌を深さ40 cmまでチェーンソーで切断し（根切り）、切断面に防根透水シートを挿入することにより、外部からの根の侵入を防いだ（根切区）。すべてのチャンバー内の地上25 cmの気温と地下5 cmの地温を、熱電対温度計を用いて計測した。一部のチャンバーでは、土壌水分計（米国Campbell Scientific社CS616）による測定を行った。なお、令和2年10月より国内のサイトにおけるすべてのチャンバーに上記の土壌水分計を順次増設した。また、各サイトにおける5個の根切りしたチャンバーに関しては、地表面から約1.6 mの位置に赤外線ヒーター（800 W）を取り付け、チャンバー内部地下5 cmの地温を約2.5°C上昇させた（温暖化区）。赤外線ヒーターは転倒防止スイッチに連結させており、ヒーター転倒時には自動的に消灯することによって森林火災を防いだ。

CH₄/CO₂フラックス（nmol m⁻² s⁻¹あるいはμmol m⁻² s⁻¹）は、（1）式を用いて算出した。

$$CH_4 / CO_2 \text{ flux} = \frac{P_0 V}{R S (T + 273.15)} \text{slope}_{CH_4 / CO_2} \quad (1)$$

ここで、 P_0 は大気圧（Pa）、 V はチャンバー容積（m³）、 R は気体定数（8.314 Pa m³ K⁻¹ mol⁻¹）、 S はチャンバー底面積（m²）、 T はチャンバー内気温（°C）、 $\text{slope}_{CH_4 / CO_2}$ は測定時間内におけるCH₄/CO₂の濃度変化速度（μmol mol⁻¹ s⁻¹あるいはnmol mol⁻¹ s⁻¹）である。なお、本稿ではCH₄/CO₂濃度の変化速度および積算値に関し、放出を正の値、吸収を負の値として表記する。すべてのサイト、チャンバーについて統一したプログラムで解析を行った。

【サブテーマ2】長期的観測データに基づいたアジア森林土壌におけるCH₄/CO₂フラックスの広域推定と将来予測

森林土壌はCO₂の28倍の温室効果を持つメタンの吸収源として機能する一方、微生物による土壌有機物の分解を介して膨大な量のCO₂排出にも寄与するなど、気候変動に対して相反する異なる2つの性質を有している。本サブテーマでは、こうした森林土壌を介したメタンガスの吸収やCO₂排出、すなわち土壌CH₄/CO₂フラックスの広域推定や将来予測を高精度で実現するため、その空間変動を規定する土壌物理・化学・生物特性の解明や温暖化に対する応答の評価を行うとともに、様々な地域に対して適用可能な推定・予測モデルの構築を行う。また、得られた結果を踏まえ、衛星観測データや機械学習を活用し、モンスーンアジア域における森林土壌CH₄/CO₂フラックスの広域推定（マップ化）を行う。また、海外の12ヶ所における研究体制の維持に向け、現地研究者のキャパシティ・ビルディングを行い、将来的なデータ集積の効率化に貢献する。

以下に、(1) 土壌炭素フラックスの温暖化応答メカニズムの解明、(2) 土壌CO₂フラックスの推定・予測モデルの構築および土壌CH₄フラックスの空間変動を規定する土壌環境要因の解明、(3) 土壌炭素フラックスの広域推定、(4) 現地研究者のキャパシティ・ビルディングの4課題について研究開発内容の概要を述べる。

(1) 土壌炭素フラックスの温暖化応答メカニズムの解明

サブテーマ1「長期的な温暖化操作実験及びCH₄/CO₂フラックスの同時連続観測による土壌炭素動態に対する気候変動影響の定量化」における温暖化操作実験の結果から、温暖化による微生物呼吸量の促進効果が長期間持続されることや、温暖化に伴う土壌の乾燥化によって土壌のCH₄フラックスが増加することなど、アジアの森林土壌が将来生じうる温暖化に対して膨大なCO₂放出源となる一方、CO₂の約28倍の温室効果を持つメタンの吸収源となることが明らかとなっている。

本課題では、微生物呼吸中の放射性炭素同位体比 ($\Delta^{14}\text{C}$)、およびメタン資化細菌やメタン生成古細菌に代表される土壌CH₄フラックスに強く寄与する土壌微生物叢の分析を通じて、土壌炭素フラックスの温暖化応答メカニズムの解明を行った。具体的には、「放射性炭素 (^{14}C) 分析による微生物呼吸の長期的な温暖化応答メカニズムの解明」課題において、微生物呼吸中の放射性炭素同位体比 ($\Delta^{14}\text{C}$) を分析し、微生物呼吸に寄与する有機物の起源や年代のサイト間の違いと温暖化による変化を明らかにした。また、「土壌微生物評価による土壌CH₄フラックスの温暖化応答メカニズムの解明」において、遺伝解析を用いてメタンの分解・生成に強く寄与するメタン資化細菌およびメタン生成菌の分析を行い、温暖化に対してメタン資化細菌およびメタン生成菌がどのような応答を示し、結果として土壌CH₄フラックスがどう変動するのかといった、一連の温暖化応答の解明を行った。

(2) 土壌CO₂フラックスの推定・予測モデルの構築および土壌CH₄フラックスの空間変動を規定する土壌環境要因の解明

サブテーマ1における土壌炭素フラックス観測から、アジアの森林における微生物呼吸量や土壌が有するメタン吸収能、およびそれらの温暖化応答は地域によって大きく異なることが明らかとなっている。アジアの森林における土壌微生物呼吸の広域推定及び将来予測を高精度で実現するためには、様々な地域に対して適用可能な土壌微生物呼吸の推定・予測モデルの構築が不可欠である。また、CH₄フラックスを正確に評価することは、地球温暖化の将来を予測する上で重要な課題であるが、森林土壌が有するメタン吸収能の時空間的変動要因については未解明な点が多い。



図-0.3. サブテーマ1が展開したチャンパーネットワークサイトにおける、土壌のサンプリングおよび実験室における土壌微生物や放射性炭素 (^{14}C) の分析の様子。

本課題では、土壌炭素フラックスの地域差・空間変動を規定する土壌環境要因の解明を試みた。具体的には、国内外7サイト（天塩温暖化、白神山地、富士北麓、つくば、広島、宮崎、中国哀牢山）において、サイトごとに3基のチャンバーから採取した土壌試料を対象に土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値を分析し、微生

物呼吸量との関連性を解析した。また、土壌試料を2種類の異なる温度条件（20℃及び30℃）で培養し、全土壌炭素の1%が分解放出されるまでの時間の比から、土壌有機炭素分解における温度依存性パラメーター（ Q_{10} ）を評価した。さらに、黒ボク土において特徴的な土壌環境・鉱物特性（土壌のバルク密度、酸性シュウ酸可溶Al及びFeの含有量など）やメタン酸化細菌・メタン生成古細菌等の微生物特性を分析し、それらの特性とメタン吸収量との関連性を解析した。

（3）土壌炭素フラックスの広域推定

サブテーマ1で観測・構築した土壌 CO_2 、 CH_4 フラックスネットワークのデータベースを活用し、日本およびモンスーンアジア域における広域のフラックス推定を行った。広域推定を行う上で、気象・水文パラメーター（気温・降水量・地温・土壌水分量；現地観測値）、衛星観測パラメーター（地表面温度・葉面積指数・正規化植生指数・正規化水指数）、土壌に関するパラメーター（土壌有機炭素量、土壌化学物質、放射性炭素同位体）などの観測パラメーターを用い、機械学習を用いたデータ駆動型の推定を行った。 CO_2 、 CH_4 ともに日本・モンスーンアジア域を対象にして、1 km^2 空間分解能、かつ、8日単位での推定を行った。また温暖化予測実験に基づいた将来予測として温度(地表面温度)を2℃上昇させた場合の推定を行った。さらに広域推定を改善するための今後の課題を整理した。

（4）現地研究者のキャパシティ・ビルディング

海外の研究機関とのオンライン会合および観測サイトにおける協働による技術的知見の提供により、現地の若手研究者の能力向上（キャパシティ・ビルディング）を図り、現地研究者による効率的な観測研究の遂行とデータの集積を実現する。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

（1）長期的な温暖化操作実験及び CH_4/CO_2 フラックスの同時連続観測による土壌炭素動態に対する気候変動影響の定量化

サブテーマ1では、北海道からマレーシアまでの広域トランゼクトに沿って温暖化操作実験サイトを中心とした13ヶ所（当初の計画では10～12ヶ所）の代表的な森林生態系における土壌呼吸（ CO_2 ）自動連続観測システムに、 CH_4 濃度の連続測定が可能な分析計を導入することで、世界的に前例のない、生態系毎または地域毎の土壌 CH_4 吸収能の定量的な評価を行うことが出来た（図-0.4）。

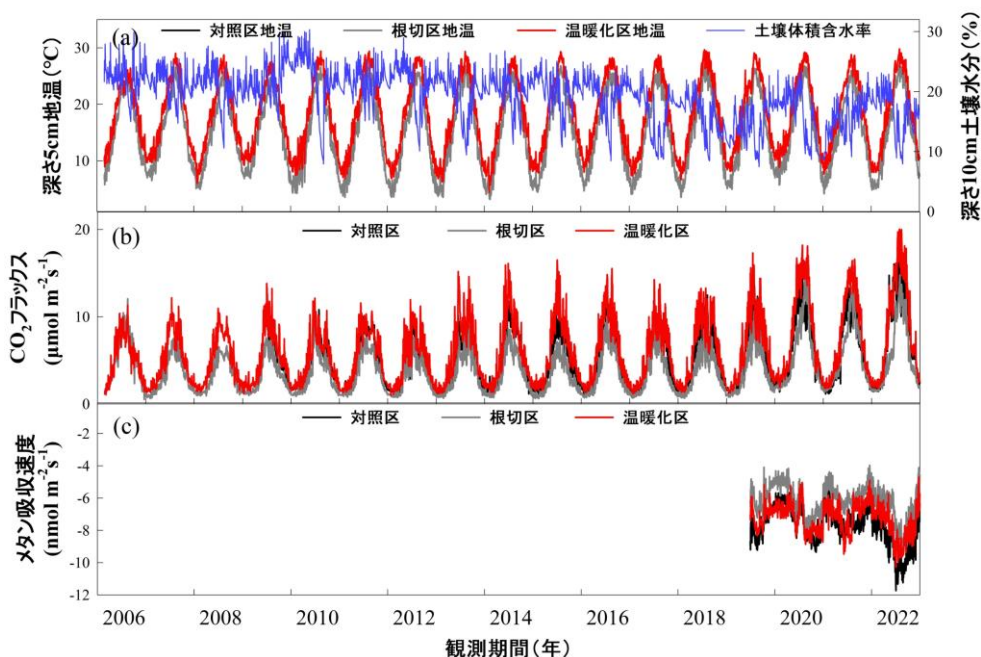


図-0.4. 関東地方のアカマツ林における松枯れとその後の自然更新（2012年～）に伴う環境要因（地温と土壌水分（a）と、各処理区における CO_2 フラックス（b）および CH_4 フラックス（c）の経年変化。

13ヶ所の森林における年間ヘクタールあたりの土壌 CH_4 フラックスの平均値は $10.7 \pm 6.0 \text{ kg CH}_4$ であり、この値は IPCC など世界規模のメタン収支の推定に基づく森林土壌 CH_4 フラックスの世界平均値 (4.2 kg CH_4) の 2.5 倍であった。この結果を検証するため(提案時には予定していなかった)、携帯型の CO_2/CH_4 フラックス測定システムを開発し、サブテーマ 1 とサブテーマ 2 が連携し、国内 41ヶ所の森林において観測キャンペーンを面的に展開した(図-0.5)。



図-0.5. 本研究で開発した可搬型 CO_2/CH_4 フラックス測定システムを用いた全国の森林における土壌 CO_2/CH_4 フラックスの観測。黄色○は他の先行研究における観測サイト、赤い○は本研究における観測サイトを示す。

本研究で求めた森林土壌におけるメタン吸収能力は、日本における先行研究のデータセット(20年ほど前に手動のガスサンプリング法を用いて国内53ヶ所で行われた観測結果: Morishita ら、2007, Ishizuka ら、2009) に比べて 1.7 倍、中国における先行研究のデータセット(65ヶ所: Yang ら、2019) に比べて 2.5 倍であった(図-0.6)。また、IPCC など世界規模のメタン収支の推定に基づいた、森林土壌における CH_4 フラックス(Dutaur and Verchot, 2007) に比べて、北方林、温帯林および熱帯林においてそれぞれ 6.4 倍、2.2 倍および 1.9 倍であった。さらに、アジア諸国の森林土壌に比べ、主に火山灰由来の日本の森林土壌のメタン吸収能は極めて高いことが示された。

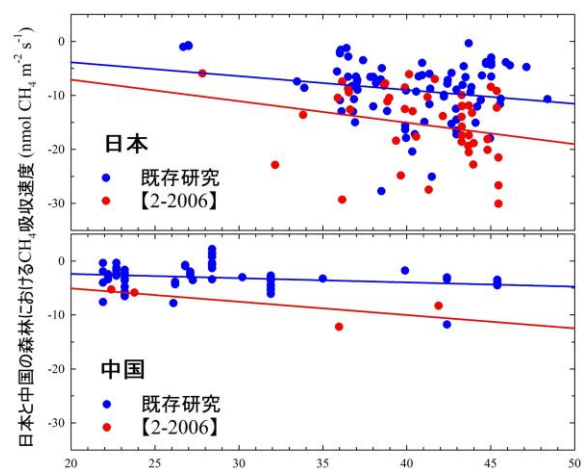


図-0.6. 本研究の観測結果と先行研究のデータセットとの比較

新たな温暖化操作実験を香港の亜熱帯林、台湾の熱帯林およびマレーシアのオイルパームプランテーションなどの3ヶ所で展開し、温暖化に対する土壌炭素貯留量の変動やメタン吸収能に関する新たなデータベースを構築した。既往の欧米における温暖化操作実験の結果（Luo ら、2001; Mellilo ら、2002, 2017）に比較すると、土壌有機炭素蓄積量が多く、湿潤なモンスーンアジア域の森林では、温暖化に伴うCO₂放出量の増加率（土壌有機炭素分解に対する温暖化効果）が大きく、かつ長期間に渡って維持されることなどが明らかになった（図-0.7）。また、その温暖化効果は熱帯林から暖温帯林、冷温帯林に沿って、土壌炭素貯留量の増加に伴って増加する傾向を示した。さらに、温暖化処理で土壌が乾燥することで、土壌CH₄フラックスが増進した（図-0.8）。土壌呼吸（CO₂排出）とCH₄吸収速度の温暖化効果の各地の平均値はそれぞれ昇温1℃あたり19.6±10.5%と13.1±13.0%であった。

一方、長期モニタリングサイトにおける長期連続観測データから、短期的な気候変動（温度、乾燥、積雪量の変化など）、台風などの自然攪乱および間伐などの人為攪乱が林床部におけるCO₂フラックスおよびCH₄フラックスに与える影響を検出することが出来た（図-0.9）。特に間伐影響に関して、林床植生を含む林床部のCO₂排出は間伐後増加した一方で、総一次生産は間伐後3~4年程度増加するものの、その増加傾向はその後徐々に元のレベル近くまで低減したため、林床部全体では間伐後CO₂の排出が徐々に増大していく傾向が見られた。

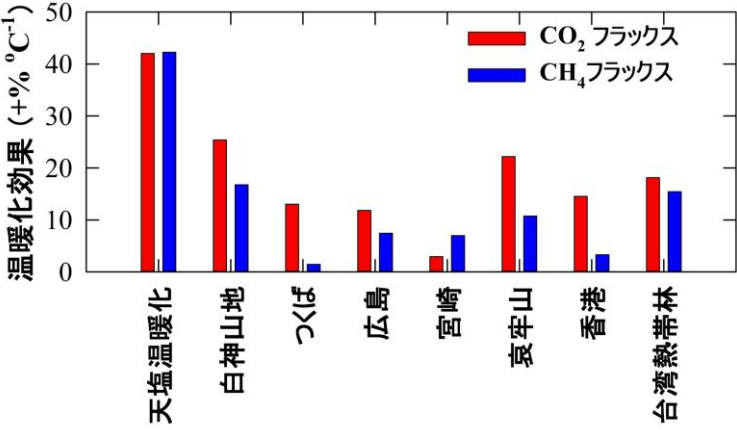


図-0.7. 異なる森林サイトにおける土壌CO₂フラックスおよびメタン吸収速度（CH₄フラックス）に対する温暖化効果（促進的な効果）

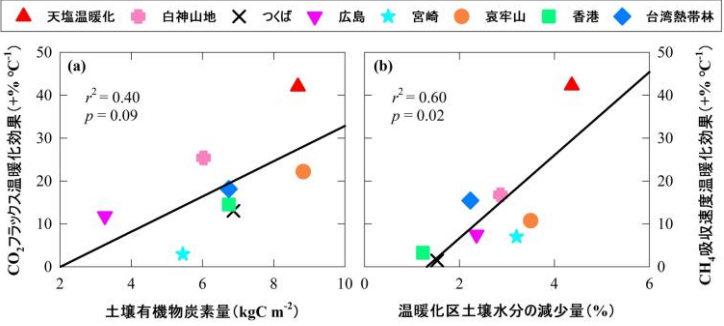


図-0.8. 異なる森林サイトにおける土壌炭素貯留量 (a) や土壌水分量の変化 (b) に対する土壌CH₄/CO₂フラックスに対する温暖化

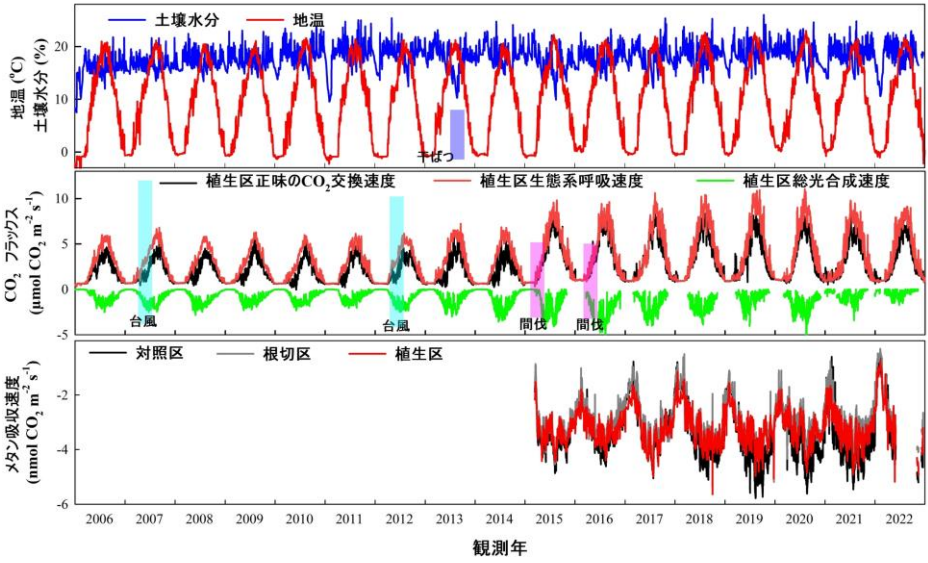


図-0.9. 富士北麓カラマツ成熟林における環境要因（地温と土壌水分、a）と、各処理区におけるCO₂フラックス (b) およびCH₄フラックス (c) の経年変化。観測が始まった2006年以来の17年間、本サイトは夏の干ばつ、高温、冬の無積雪、大型台風および間伐など様々な攪乱を受けた。

(2) 土壌炭素フラックスの温暖化応答メカニズムの解明

微生物呼吸中の放射性炭素同位体比 ($\Delta^{14}\text{C}$)、およびメタン資化細菌やメタン生成古細菌に代表される土壌 CH_4 フラックスに強く寄与する土壌微生物叢の分析を通じて、土壌 CO_2/CH_4 フラックスの温暖化応答メカニズムの解明を行った。

まず、温暖化に伴う微生物呼吸の増加とその長期維持メカニズムを解明するため、温暖化操作を実施している国内5サイトを対象に、採取した微生物呼吸中の $\Delta^{14}\text{C}$ 値とチャンバー内の土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値との関係を把握した (図-2.1)。その結果、微生物呼吸中の $\Delta^{14}\text{C}$ 値は、天塩温暖化サイト以外の4サイトではリター層における土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値に近く、数年程度で代謝回転する有機炭素が微生物呼吸の主な起源となっていること、また、代謝回転の早い有機物が枯渇している様子はなく、今後も温暖化による微生物呼吸の促進効果が持続する可能性が明らかとなった。

また、土壌 CH_4 フラックスの温暖化応答メカニズムの解明に向け、温暖化区と根切区における土壌深度ごとの土壌細菌量、メタン資化細菌量およびメタン生成古細菌量の比較を行った。その結果、温暖化に伴う土壌の乾燥は、大気と土壌との間でのガス交換を促し、好気性細菌であるメタン資化細菌の増加 (図-2.5b) と偏性嫌気性細菌であるメタン生成古細菌の減少 (図-2.5c) をもたらし、結果としてメタン吸収量の大幅な増加をもたらしたと考えられた。

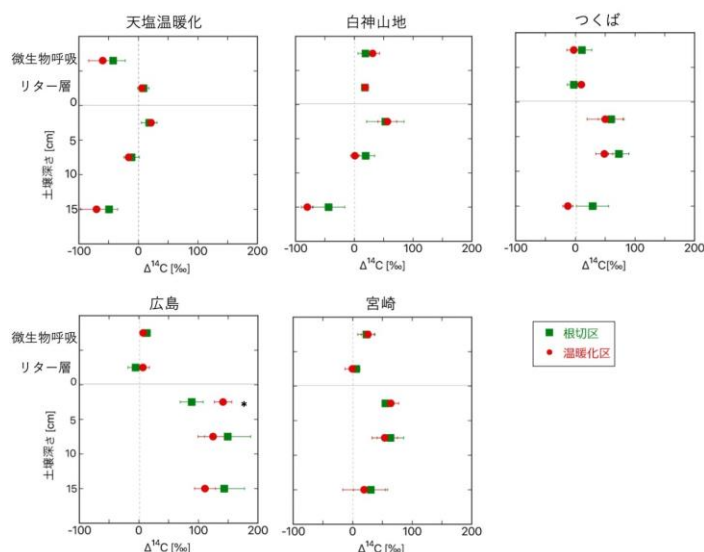


図-2.1 温暖化操作実験サイトの根切区と温暖化区における微生物呼吸と土壌有機物の $\Delta^{14}\text{C}$ 値分布

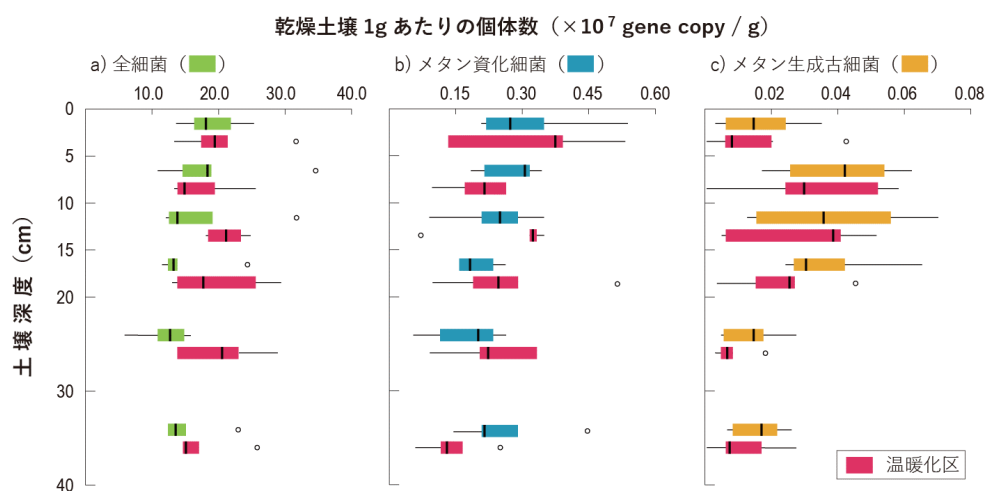


図-2.5 天塩温暖化サイトの温暖化区と根切区における土壌深度ごとの土壌細菌量、メタン資化細菌量およびメタン生成古細菌量

(3) 土壌 CO_2 フラックスの推定・予測モデルの構築および土壌メタンフラックスの空間変動を規定する土壌環境要因の解明

土壌微生物呼吸の推定・予測モデルの構築に関して、国内外7サイトにおいて、土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$

値と、サブテーマ1の連続観測によって評価された年積算微生物呼吸量との関連性を解析した。その結果、土壤有機炭素量あたりの微生物呼吸量と土壤有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値の間に正の相関関係を見出し、年積算微生物呼吸量を土壤有機炭素の蓄積量と $\Delta^{14}\text{C}$ 値に基づいて推定できることが明らかになった。さらに、土壤培養実験によって評価した Q_{10} 値と土壤有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値の間にも負の相関関係（図-0.12）を見出すことに成功し、土壤有機炭素の温度応答もまた土壤有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値に基づいて推定できることを示した。以上のことから、任意の森林土壌における年間微生物呼吸量とその温暖化応答を土壤有機炭素の蓄積量と $\Delta^{14}\text{C}$ 値の関数として推定・予測できるモデルを構築した。

土壤メタンフラックスの空間変動を規定する要因に関して、国内外7サイトにおいて、土壤環境・鉱物特性と、サブテーマ1の連続観測によって評価された年間メタン吸収量との関連性を解析した。その結果、黒ボク特徴の指標として用いられる非晶質鉱物含有量（酸性シュウ酸可溶Al及びFeの含有量から算出）と年間メタン吸収量との間に負の相関関係（図-0.13）があることを初めて発見した。この結果は、土壤の非晶質鉱物含有量がメタン吸収量の地域差や空間変動を規定する重要な要因となっていること、すなわちこのパラメーターを用いてメタン吸収量を推定できることを示すとともに、火山灰の影響を強く受けた土壌（とりわけ黒ボク土）でメタン吸収が大きくなるという本研究提案における仮説を支持する成果である。

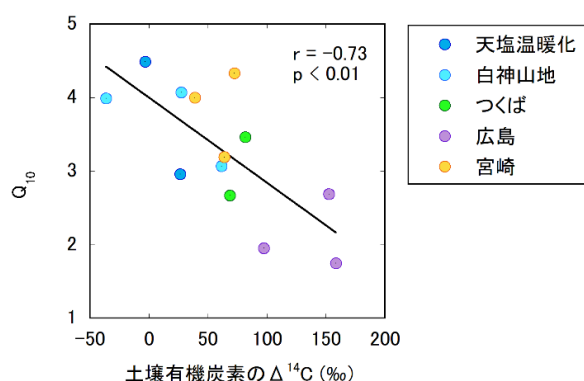


図-0.12. 土壤有機炭素分解の温度依存性（ Q_{10} ）と土壤有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値との関係

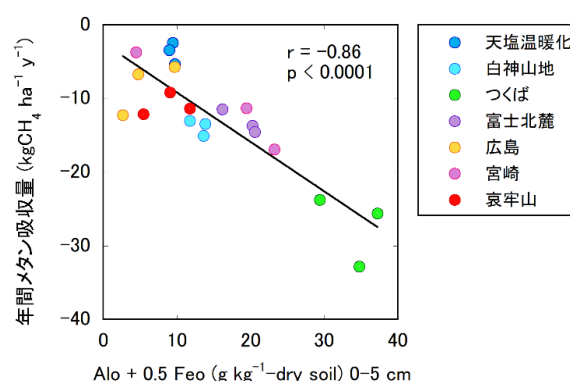


図-0.13. 年間メタン吸収量と非晶質鉱物含有量との関係

（４）土壤炭素フラックスの広域推定

サブテーマ1で観測・構築した土壤 CO_2 、 CH_4 フラックスネットワークデータと種々の説明変数を用いて機械学習法（ランダムフォレスト回帰）によりモデルを構築した。 CO_2 フラックスについては、サイト観測のフラックスを十分に再現できていた。一部、広域では得られないパラメーターが推定には重要であるケース（例えば、 CO_2 フラックスについては放射性炭素同位体比、 CH_4 フラックスについては $\text{Alo}+0.5\text{Feo}$ 値など）があり、広域推定をよくするためには、代替となりうるパラメーターを模索する必要がある。

本研究で推定したモンスーンアジア域での土壤 CO_2 、 CH_4 フラックスの空間分布を図-2.15に示す。本研究では衛星観測データを活用することで空間分解能1 km、8日単位の推定を可能とした。さらに温暖化操作実験として地温を 2°C 上昇させた実験を行い、対照区と比較したところ、温暖化区における土壤呼吸量は8.2%上昇し、 CH_4 吸収量は2.2%増加した。この数値はサブテーマ1の観測から得た値よりは小さな値となった。本研究による推定は既存研究の推定に比較して地形・温度を反映したより現実的な空間分布となった。本研究のプロダクトは今後土壌からの温室効果ガス収支のモニタリングデータとしての活用、さらには、プロセスベースの陸域炭素循環モデルの改善に向けた活用などに利用可能で、将来の温室効果ガスの収支の予測の確度の向上にも貢献できる。

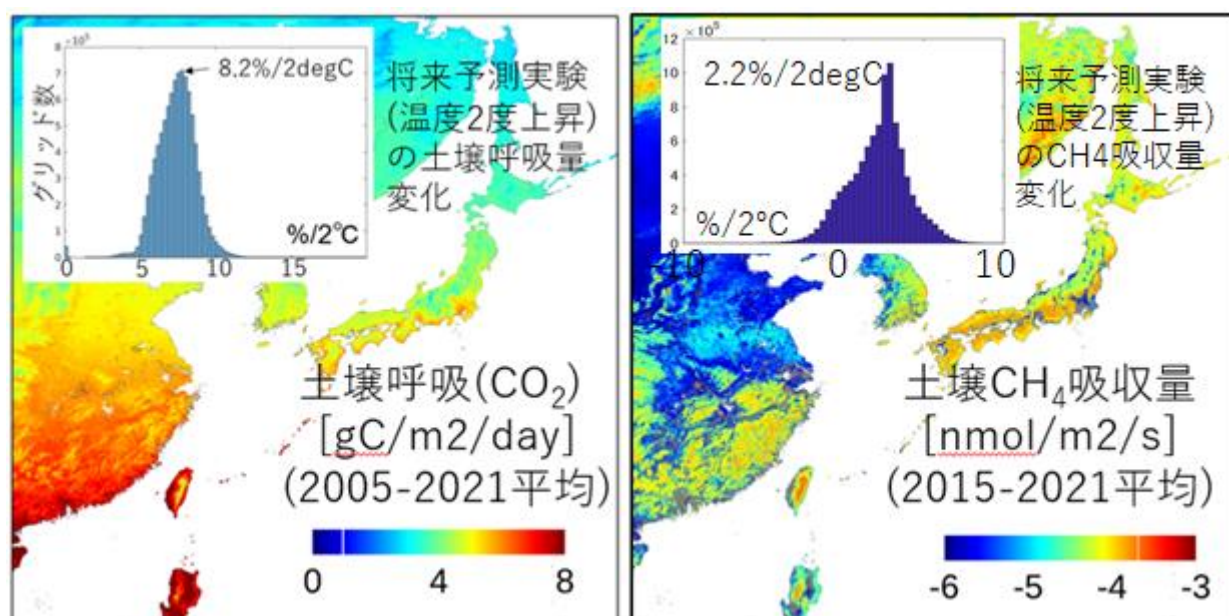


図-2.15. 本研究で推定したモンスーンアジア域における年間土壌CO₂とCH₄フラックスの空間分布と、温暖化実験（地表面温度2度上昇）におけるCO₂とCH₄フラックスの変化(%/2°C) (CH₄については正の値は吸収量が増えることを示す)。

（５）現地研究者のキャパシティ・ビルディング

海外の研究機関とのオンライン会合および観測サイトにおける協働による技術的知見の提供により、現地の若手研究者の能力向上（キャパシティ・ビルディング）を図り、現地研究者による効率的な観測研究の遂行とデータの集積を実現した。具体的には、コロナ禍において海外渡航が不可能であった2020年、2021年度については、オンラインにより中国および台湾のサイトにおける観測機器のメンテナンス手法に係る技術提供を行うとともに、コロナ禍に伴う各種制限が解除された2022年度はマレーシアの低地熱帯林サイトおよびオイルパームサイトにおいて、マレーシア森林研究所（Azian Mohti 博士ら）、マレーシアオイルパーム庁（Mei Ching Law 博士ら）、およびサラワク泥炭地研究所（Ken Wong 博士および Frankie Kiew 博士）の研究者の見学の受け入れを行い、観測サイトの維持と現地観測を共同で行うことにより、キャパシティ・ビルディングの構築に努めた。

5－2．環境政策等への貢献

本提案の先行研究成果の一部は、2019年に公開されたIPCC特別報告書（気候変動と土地）に引用されたため、本研究の成果をIPCC第6次評価報告書（AR6）の第二作業部会（WG2: 影響・適応・脆弱性）の委員に積極的に宣伝している。全球のメタン収支を考える上で土壌でのメタン酸化（分解）は対流圏での酸化作用に次いで大きな吸収源であるとともに人為的に変化しうるものである。森林土壌でのメタン酸化は農地に比べて大きいと考えられるため、農地への土地転用は土壌でのメタン吸収を減少させることになる。現状では、観測データの不足などから森林土壌のメタン酸化能の算定には大きな不確かさが残り、温室効果ガスインベントリなどにも反映されていない。本研究の成果により、日本とアジア域の森林土壌によるメタン酸化・吸収能の精緻な定量評価が可能となり、温室効果ガス排出・吸収量の推計手法の改善に大きく貢献できる。これはインベントリデータと衛星観測データなどの整合性を向上させ、国際的な排出・吸収の監視体制構築の実効性を高める。

<行政等が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

最も特筆すべき点として、本課題では、全国の41ヶ所の森林において観測した土壌CH₄吸収速度の年間値はヘクタールあたり平均15.1 kgに上り、アジアモンスーン域にある海外の森林土壌に比べて有意に大きいだけでなく、既存の国内の報告に比べても顕著に（約50%）大きいことが明らかになったことである。本結果に基づいて概算した日本全国の森林土壌における年間CH₄吸収量は、農業活動（稲作や畜産など）に由来するCH₄排出量の48%に相当する。この割合は、地球規模のメタン収支の最新評価（Global Methane Budget 2020; IPCC AR6）における土壌CH₄吸収によるCH₄排出量の相殺割合（約18%）を大きく上回るものである。このことは、日本国内の森林の保全が、CO₂吸収源としての機能維持に有用なだけでなく、CH₄の濃度上昇の抑制にも大きな役割を果たす可能性を示している。したがって、本提案課題で得られた成果は国内および国際的な気候変動対策において重要な指針を示す科学的根拠になると考えられる。

5－3．研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
本研究では、北海道最北端から赤道付近のマレーシアまでのアジアにおける広域トランゼクトに沿って、代表的な森林生態系で土壌温暖化操作実験を行うとともに、土壌CH₄/CO₂フラックスやそれに関する土壌微生物、¹⁴Cに関する包括的な観測、分析を行う。本研究の最終目標は、我々が実施する統一的な観測、分析データに基づき、機械学習など複数のモデルを用いて、アジア域の森林の土壌CH₄/CO₂フラックスに関する1 kmメッシュの超高解像な広域推定を行うとともに、土壌有機炭素貯留量やCH₄吸収能に対する気候変動影響の将来予測を行うことである。	目標を上回る成果をあげた。 1. 広域トランゼクトに沿った土壌温暖化操作実験では、コロナ禍にもかかわらず、海外観測サイトを含めて観測やサンプリングなどを計画通り実施した。特に、メタンに関しては当初の計画より連続観測サイトとして3ヶ所（国内2ヶ所、マレーシア1ヶ所）多く展開し、さらに手動観測を国内40数カ所で実施して、以下の重要な成果を得た。 (1) 温暖化で土壌呼吸（CO₂排出）とCH₄吸収速度いずれもが増加し、土壌呼吸（CO₂排出）とCH₄吸収速度の温暖化効果はそれぞれ昇温1℃あたり19.6±10.5%と13.1±13.0%であった。 (2) 土壌呼吸の温暖化効果は土壌炭素量と正の相関を示す。 (3) CH₄吸収速度の温暖化効果は土壌水分の減少量と正の相関を示す。 2. 土壌CH₄/CO₂フラックス、土壌微生物、¹⁴Cに関する包括的な観測と分析から、下記の通りモンスーンアジア域における土壌CH₄/CO₂フラックスの地域差や温暖化応答を規定する要因を抽出することに成功した。 (1) 土壌有機炭素の¹⁴Cは、微生物呼吸の空間変動を説明する有力なパラメーターであり、温度応答を推定する上でも重要な指標となる。 (2) 短期的な土壌CH₄フラックスの変動を説明する上では土壌微生物量が、年間のCH₄吸収量の空間変動を説明する上では土壌の非晶質鉱物含有量が重要な指標となる。 (3) 土壌有機物の豊富な蓄積や微生物呼吸起源の変化が微生物呼吸の温暖化応答の長期持続の主要因に、メタン資化細菌の増加とメタン生成古細菌の減少が土壌CH₄吸収量を増加させる主要因になっている。

	3. 観測・分析データに基づいた機械学習モデルに関しては、モンスーンアジア域におけるCH₄吸収および土壌呼吸の空間分布を、従来報告を大きく上回る1 kmメッシュの超高解像な空間分解能で推定することに成功した。 4. 将来予測に関しては、温暖化操作実験の観測結果や構築した広域推定モデルに基づいて、森林土壌における土壌呼吸（CO₂放出）およびCH₄吸収能に対する温暖化影響をモンスーンアジア域を対象に評価した。その結果2°Cの温度上昇によって、土壌呼吸が8.2%、CH₄吸収量が2.2%増加すると予測された。
--	---

サブテーマ1 目標	目標の達成状況
本サブテーマでは、観測データの不足しているアジアモンスーン地域において、世界最大規模のチャンパー観測ネットワーク（国内8ヶ所、海外12ヶ所）を用いて、土壌CH₄/CO₂フラックスの地域差および生態系による差を明らかにすることに加え、気候変動や攪乱の影響評価を行うことを目標とする。具体的には、温暖化操作実験をこれまでデータ集積のなかった熱帯林まで拡大するとともに、温暖化操作実験サイトを中心とした10~12ヶ所の森林における土壌呼吸自動連続観測システムに、CH₄濃度の連続測定が可能な分析計を導入することで、世界的に前例のない、生態系毎または地域毎の土壌CH₄吸収能の定量的な評価を行う。また、本研究を実施することで、得られた10~20年間におよび土壌呼吸の長期観測データを統一的なプロトコルで解析し、温暖化や気候変動に伴った極端現象（高温・乾燥）、台風（豪雨）、エルニーニョ現象、また森林施業（間伐・皆伐）や土地利用変化（天然林からプランテーションへの転換）などの人為的な活動が各生態系の土壌呼吸に与える影響評価を行う。さらに、統一されたプロトコルから得られた長期観測データセットをサブテーマ2	目標を上回る成果をあげた。 1. 温暖化操作実験および生態系毎・地域毎の土壌CH₄吸収能の定量的な評価に関しては、以下の成果を挙げた。 (1) オンラインでの指導によって現地研究者のキャパシティ・ビルディングを行い、温暖化操作実験の実施例が世界的に少ない熱帯生態系2ヶ所（台湾の熱帯常緑広葉樹林およびマレーシア半島部のオイルパームプランテーション）で操作実験を開始することができた。 (2) 各地の平均を取ると、温暖化で土壌呼吸（CO₂排出）とCH₄吸収速度が、それぞれ昇温1°Cあたり19.6±10.5%と13.1±13.0%増加した。 (3) 本研究で導かれたCH₄吸収能の値は、日本や中国における既存の報告と比べて著しく高い（日本で約1.7倍、中国で約2.5倍）ものであり、今後の気候変動対策において重要な科学的根拠になる知見が得られた。 2. 自然および人為的な攪乱影響評価に関しては、土壌呼吸に対してのみではなく、土壌を中心としたCH₄/CO₂ フラックスにまで評価範囲を広げて下記の成果を得た。 (1) 林床植生を含む林床部のCO₂排出は間伐後増加した一方で、総一次生産は間伐後3~4年程度増加するものの、その増加傾向はその後徐々に元のレベル近くまで低減したため、林床部全体では間伐後CO₂の排出が徐々に増大していく傾向が見られた（富士北麓カラマツ成熟林）。 (2) 極端に降水量が多かった年のCH₄吸収量は、そうではなかった年と比して著しく小さくなった（東北地方冷温帯落葉広葉樹林）。 3. モデルによる広域推定及び将来予測の精緻化への貢献に関しては、当初の計画より豊富なデータセットを提供することができ、CH₄吸収および土壌呼吸の空間分布や温暖化に対する将来

に提供し、モデルによる広域推定及び将来予測の精緻化に貢献する。	予測を、従来報告を大きく上回る1 kmメッシュの超高解像な空間分解能で推定することを可能にした。
---------------------------------	--

サブテーマ2 目標	目標の達成状況
本サブテーマでは、サブテーマ1が構築したプラットフォーム及びデータセットを活用し、土壌CH₄/CO₂フラックスの気候変動に対する長期的な応答メカニズムの解明と、それに基づく広域推定および将来予測を行うことを目標とする。具体的には、土壌微生物特性と土壌呼吸に由来する¹⁴Cの分析により、アジア域の森林における土壌呼吸量や土壌呼吸に対する温暖化影響と、微生物特性（バイオマス・種組成）および有機炭素分解特性（分解された有機炭素の年代等）との関係性を明らかにする。特に、温暖化処理前後の微生物と土壌呼吸に由来する¹⁴Cの変化量から、温暖化によってアジアモンスーン域の有機炭素分解が増進し、その増進効果が長期的に維持されるメカニズムの解明が可能となる。さらに、土壌CH₄フラックスに関わるCH₄分解菌・生成菌の分析によって、CH₄の吸収速度と土壌構造（孔隙率や有機炭素含有量）や環境因子（特に土壌水分）、生物因子（優占樹種）などとの関係性が解明できる。これらの知見を基に、サブテーマ1の観測ネットワークにおける土壌CH₄/CO₂フラックスを説明する関係式を構築する。開発された関係式やその他衛星観測データなどに基づき、アジア域における森林土壌CH₄/CO₂フラックスの広域推定および将来予測を行う。 加えて、海外の12ヶ所（計4カ国（地区））における研究体制の維持にあたっては、現地研究者のキャパシティ・ビルディングを行い、日本のア	目標を上回る成果をあげた。 1. チャンバー観測ネットワークサイトにおいて、土壌微生物特性や土壌¹⁴C、土壌呼吸¹⁴Cなどの分析を通して、土壌呼吸やその温暖化応答に関する以下のことを明らかにした。 (1) 土壌有機炭素の¹⁴Cが微生物呼吸の地域差や空間変動を説明できる有力なパラメーターとなるのみならず、微生物呼吸の温度応答を推定するための指標としても利用できる。 (2) 好機的な土壌では、温暖化処理による微生物呼吸¹⁴Cの変化がなかったことから、長期の温暖化を経ても代謝回転の速い有機物が枯渇することなく、今後も温暖化による微生物呼吸の促進効果が持続する。 (3) 嫌気的な泥炭土壌では、温暖化処理による微生物呼吸¹⁴Cの変化が認められたことから、温暖化に伴う土壌の乾燥が土壌下層の有機炭素の分解を引き起こす。 (4) 以上より、アジアモンスーン域の土壌の豊富な有機物蓄積が、温暖化効果が長期にわたり持続する主要因となっている。 2. チャンバー観測ネットワークサイトにおいて、CH₄分解菌・生成菌や土壌構造等の分析を通して、土壌CH₄フラックスに関する以下のことを明らかにした。 (1) 温暖化に伴う土壌の乾燥は、好気性細菌であるメタン酸化細菌の増加と偏性嫌気性細菌であるメタン生成古細菌の減少をもたらすことでCH₄吸収量を大幅に増加させる。 (2) 土壌微生物量は高い季節性があり、2週間から3ヶ月程度の短期の土壌CH₄フラックスの推定に有効なパラメーターとなる。 (3) 土壌の非晶質鉱物含有量が高いほど土壌CH₄吸収量が大きくなるという関連性を初めて見出し、火山灰の影響を強く受けた土壌においてCH₄フラックスが大きくなるという仮説を立証した。 3. サブテーマ1及び2の観測・分析結果を活用して、土壌CH₄/CO₂フラックスの広域推定・将来予測に関する以下のことを明らかにした。 (1) 土壌特性データに基づいた土壌CH₄/CO₂フラックス推定式を構築した。 (2) モンスーンアジア域における土壌呼吸量の空間分布及び温暖

ジア地域におけるイニシアティブを発揮し、将来的なデータ集積の効率化に貢献する。	化応答を、従来報告をはるかに上回る空間分解能で推定した。 (3) モンスーンアジア域における土壌CH₄フラックスの広域評価及び将来予測を初めて実現した。その結果2℃の温度上昇によって、土壌呼吸が8.2%、CH₄吸収量が2.2%増加すると予測された。 4. 海外の研究機関とのオンライン会合による技術的知見の交換や、フィールド調査時における試料採取・分析に係る技術指導を通して、現地の若手研究者の能力向上（キャパシティ・ビルディング）をはかり、コロナ禍において渡航制限のある中で効率的な観測・実験研究の遂行とデータの集積を実現した。
--	--

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

8件

<主な査読付き論文>

- 1) X. ZHAO, N. LIANG, J. ZENG, A. MOHTI: Soil Biol. Biochem, 152, 108067 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108067> (IF: 8.546)
A simple model for partitioning forest soil respiration based on root allometry.
- 2) L. SHA, M. TERAMOTO, N. NOH, S. HASHIMOTO, M. YANG, M. SANWANGSRI, N. LIANG: Journal of Agricultural Meteorology, 77, 24–51 (2021), <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-20-00013> (IF: 1.375)
Soil carbon flux research in the Asian region: Review and future perspectives.
- 3) R. CUI, T. HIRANO, L. SUN, M. TERAMOTO, N. LIANG: J. Agric. Meteorol, 77(3), (2021), <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-20-00049> (IF: 1.375)
Variations in biomass, production and respiration of fine roots in a young larch forest.
- 4) 平野高司 (2021), 地球環境, 26, 57-68
「森林生態系における炭素循環観測」 (総説)
- 5) M. TERAMOTO, T. HAMAMOTO, N. LIANG, T. TANIGUCHI, T.Y. ITO, R. HU, N. YAMANAKA: Sci. Rep. 12, 14320 (2022), <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17787-8> (IF: 4.996)
Abiotic and biotic factors controlling the dynamics of soil respiration in a coastal dune ecosystem in western Japan.
- 6) T. HIRANO, R. CUI, L. SUN, M. TERAMOTO, N. LIANG: Plant Soil (2023) 482:57–72. (2023), <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05674-0> (IF: 5.440)
Partitioning of root respiration into growth, maintenance, and ion uptake components in a young larch-dominated forest.
- 7) T. LI, H. F. CHENG, Y. LI, Z. MOU, X. ZHU, W. WU, J. ZHANG, L. KUANG, J. WANG, D. HUI, H. LAMBERS, J. SARDANS, J. PEÑUELAS, H. REN, A. B. MOHTI, N. LIANG, Z. LIU: Science of The Total Environment 881 (2023) 163204. (2023) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163204> (IF: 10.754)
Divergent accumulation of amino sugars and lignins mediated by soil functional carbon pools under tropical forest conversion.

- 8) J. ZHANG, L. KUANG, Z. MOU, T. KONDO, J. KOARASHI, M. ATARASHI-ANDOH, Y. LI, X. TANG, Y. -P. WANG, J. PENUELAS, J. SARDANS, D. HUI, H. LAMBERS, W. WU, J. KAAL, J. LI, N. LIANG AND Z. LIU: Plant Soil, 1573-5036 (2022), <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05642-8> (IF: 5.440)
Ten years of warming increased plant-derived carbon accumulation in an East Asian monsoon forest.

6－2．知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6－3．その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	2件
口頭発表（学会等）	67件
「国民との科学・技術対話」の実施	3件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究費の研究成果による受賞	0件
その他の成果発表	0件

7．国際共同研究等の状況

- ① 中国科学院西双版纳热带植物园：共同研究のため、国立環境研究所が 2010 年より中国雲南省にある 2 ヶ所の亜熱帯自然保護林（哀牢山と麗江）において温暖化操作実験を開始した（そのうち哀牢山サイトにおいて、2017 年より CH₄ フラックスの連続測定も開始した）。本サイトの責任者である張一平博士は広島大学で学位を取得し、日本との共同研究に意欲的であった。また、2-1705 などの先行課題により日本に数度招聘し、関連研究のトレーニングを受け、サイトを継続利用した。なお、麗江保護林では、近年山火事が頻発したため、2-2006 課題が開始した直後に温暖化処理は強制的に停止された。
- ② 国立台湾大学：国立環境研究所が 2011 年より台湾大学演習林との共同研究を行っている台湾の 3 ヶ所の森林にチャンバー観測システムを設置した。本サイトの責任者である江博能准教授は、2-1705 などの先行課題により日本に数度招聘し、関連研究のトレーニングを受け、サイトを継続利用した。コロナ禍にも関わらず、江氏は 2021 年 2 月に台湾大学演習林が管轄する下坪熱帯植物園内の熱帯林に新規の温暖化操作実験サイトを設置した。
- ③ 香港中文大学：共同研究のため、国立環境研究所が 2017 年より香港の亜熱帯林に設置したチャンバー観測サイトを継続利用した。本サイトでは 2019 年 9 月から温暖化操作実験が開始された。
- ④ マレーシア森林研究所（FRIM）：熱帯林の炭素循環を解明するため、FRIM が管理するマレーシア半島部のパソ保護区及びその周辺の熱帯生態系に国立環境研究所が 2017 年に設置したチャンバー観測サイト（計 5 サイト）を継続利用した。また、パソ保護区周辺のオイルパームプランテーションでは、コロナによる渡航制限が解除された後、2022 年 9 月に新規の温暖化操作実験サイトを設置した。

8．研究者略歴

研究代表者

梁 乃申（兼サブテーマ1のリーダー）

新潟大学大学院自然科学研究科修了、学術博士、現在国立研究開発法人国立環境研究所地

球システム領域炭素循環研究室室長

研究分担者

- 1) 高橋 善幸 (サブテーマ1)
名古屋大学大学院理学研究科課程満了、博士 (理学)、現在、国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域地球環境研究センター陸域モニタリング推進室室長
- 2) 高木 健太郎 (サブテーマ1)
北海道大学大学院地球環境科学研究科博士後期課程修了、博士 (地球環境科学)、現在、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター 教授
- 3) 平野 高司 (サブテーマ1)
北海道大学大学院農学研究科修士課程修了、博士 (農学)、現在、北海道大学大学院農学研究院教授
- 4) 石田 祐宣 (サブテーマ1)
東北大学大学院理学研究科博士後期課程 (地球物理学専攻) 中退、のち博士 (理学) の学位取得 (東北大学)、現在、弘前大学大学院理工学研究科 准教授 (同研究科寒地気象実験室 室長兼任)
- 5) 高木 正博 (サブテーマ1)
九州大学大学院農学研究科博士後期課程修了、博士 (農学)、現在、宮崎大学農学部教授
- 6) 寺本 宗正 (サブテーマ1)
東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程修了、博士 (農学)、現在、鳥取大学乾燥地研究センター助教
- 7) 市井 和仁 (サブテーマ2 のリーダー)
名古屋大学大学院理学研究科博士課程 (後期課程) 修了、博士 (理学)、現在、千葉大学環境リモートセンシング研究センター教授
- 8) 近藤 俊明 (サブテーマ2)
広島大学大学院国際協力研究科修了、博士 (学術)、現在、国際農林水産業研究センター主任研究員
- 9) 小嵐 淳 (サブテーマ2)
名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士 (工学)、現在、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究センター研究主席
- 10) 安藤 麻里子 (サブテーマ2)
茨城大学大学院理工学研究科博士後期課程修了、博士 (理学)、現在、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究センター研究主幹

II. 成果の詳細

II-1 長期的な温暖化操作実験及びCH₄/CO₂フラックスの同時連続観測による土壌炭素動態に対する気候変動影響の定量化

国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域/室長	梁 乃申
国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域/室長	高橋 善幸
北海道大学北方生物圏フィールド科学センター/教授	高木 健太郎
北海道大学大学院農学研究院/教授	平野 高司
弘前大学大学院理工学研究科/准教授	石田 祐宣
宮崎大学農学部/教授	高木 正博
鳥取大学乾燥地研究センター/助教	寺本 宗正

[要旨]

メタンはCO₂に次いで重要な温室効果ガスであり、近年大気中のメタン濃度は増加を続けている。土壌のメタン吸収能は土壌中のガス拡散速度に強く依存するが、気候変動に伴う土壌メタン吸収能の時空間的変動パターンや環境要因に対する応答は統一的な見解が得られていない。本研究では8つの森林生態系における長期的温暖化実験の結果に基づき、CH₄/CO₂フラックスの温暖化に対する応答を評価した。その結果、CO₂フラックスの温暖化効果は熱帯林から暖温帯林、冷温帯林に沿って、土壌炭素貯留量の増加に伴って増加する傾向を示した。CH₄フラックスの温暖化効果には、温暖化によって土壌が乾燥することで、土壌CH₄フラックスが増進した。一方、長期モニタリングサイトにおける長期連続観測データから、短期的な気候変動（温度、乾燥、積雪量の変化など）、台風などの自然攪乱および間伐などの人為攪乱が林床部におけるCH₄/CO₂フラックスに与える影響を検出することが出来た。

1. 研究開発目的

本研究では、土壌の炭素蓄積能やメタン吸収能に対する気候変動の影響について日本を含むアジア域の森林で総合的に評価するために、北海道からマレーシアまでの広域トランゼクトに沿って選定した代表的な森林生態系を対象に（1）CH₄フラックスの連続観測を新規に10～12ヶ所で展開し、森林土壌のCH₄フラックスに関する世界的に貴重な長期連続観測データを得る。得られた観測データに基づき、機械学習や経験モデル等の複数のアプローチを検証しながら活用し、アジア域における超高解像な土壌CH₄/CO₂フラックスの広域推定と将来予測を行う。本研究の研究成果によって、パリ協定やSDGsの目標達成のために、土壌炭素貯留量やCH₄吸収能の維持及び強化を考慮した緩和策と適応策の策定に資する科学的根拠を提供する。

2. 研究目標

本サブテーマでは、観測データの不足しているアジアモンスーン地域において、世界最大規模のチャンパー観測ネットワーク（国内8ヶ所、海外12ヶ所）を用いて、土壌CH₄/CO₂フラックスの地域差および生態系による差を明らかにすることに加え、気候変動や攪乱の影響評価を行うことを目標とする。具体的には、温暖化操作実験をこれまでデータ集積のなかった熱帯林にまで拡大するとともに、温暖化操作実験サイトを中心とした10～12ヶ所の森林における土壌呼吸自動連続観測システムに、CH₄濃度の連続測定が可能な分析計を導入することで、世界的に前例のない、生態系毎または地域毎の土壌CH₄吸収能の定量的な評価を行う。また、本研究を実施することで、得られた10～20年間におよぶ土壌呼吸の長期観測データを統一的なプロトコルで解析し、温暖化や気候変動に伴った極端現象（高温・乾燥）、台風（豪雨）、エルニーニョ現象、また森林施業（間伐・皆伐）や土地利用変化（天然林からプランテーションへの転換）などの人為的な活動が各生態系の土壌呼吸に与える影響評価を行う。さらに、統一され

たプロトコルから得られた長期観測データセットをサブテーマ2に提供し、モデルによる広域推定及び将来予測の精緻化に貢献する。

3. 研究開発内容

(1) 温暖化操作実験による土壌 CH_4/CO_2 フラックスの温暖化影響及びフィードバック効果の定量評価

1) 最北端針広混交林（天塩温暖化）：北海道大学天塩研究林における、約40年生の針広混交林（北海道天塩郡幌延町字問寒別、 $44^{\circ}55' \text{N}$ 、 $142^{\circ}01' \text{E}$ 、標高20 m）を調査地とした（図-1.1a）。年平均気温は 5.5°C であり、年降水量は 1,115 mm である。土壌は 40 cm 以上にわたって有機物に富んだ古い泥炭土壌である。本サイトには推進費課題（B-073）により2007年7月13日に土壌呼吸測定システムを設置し、2020年5月14日に CH_4/CO_2 分析計（米国LI-COR社LI-7810）を増設した。温暖化処理と CH_4/CO_2 フラックスの観測は積雪がない時期のみ行った。何も処理を行わない対照区（5反復）、根の呼吸の影響を排除した根切区（5反復）、温暖化処理を行った根切区（5反復、以下温暖化区とする）を設置した（他の温暖化サイトでも、これら3つの処理区を同様に設置した）。

2) 東北地方冷温帯落葉広葉樹林（白神山地）：青森県西津軽郡西目屋村の白神山地にある、約80年生のミズナラ林（ $40^{\circ}32' \text{N}$ 、 $140^{\circ}13' \text{E}$ 、標高245 m）を調査地とした（図-1.1b）。年平均気温は 8.4°C であり、年降水量は2,579 mm である。地球一括計上課題（環1051）により2011年9月から土壌呼吸測定システムを設置し、2020年6月4日に CH_4/CO_2 分析計（カナダABB社MGGA）を増設して温暖化処理および CH_4/CO_2 フラックスの観測を開始した。各処理区5反復を設置し、無雪期における連続観測を行った。

3) 関東地方衰退したアカマツ林（つくば）：茨城県つくば市の国立環境研究所敷地内のアカマツ林（ $36^{\circ}3' \text{N}$ 、 $140^{\circ}7' \text{E}$ 、標高 23 m）を調査地とした（図-1.1c）。調査林分は、約 55 年生のアカマツが優占していたが、2012 年以降ほぼ全てのアカマツがマツ枯れ病で枯れ、現在はシラカシが優占している。年平均気温は 13.8°C であり、年降水量は約 1,283 mm である。本調査地は他と異なり、まず 2006 年 2 月に根切区と温暖化区の 2 処理区を 6 反復設定し、測定を開始した。推進費課題（B-073）により 2009 年 7 月に対照区に 8 基のチャンバー追加を行い、 CO_2 フラックスを通年連続測定した。2019 年 7 月 1 日に CH_4/CO_2 分析計（米国 LGR 社 UGGA）を増設して、 CH_4/CO_2 フラックスの連続観測を行った。

4) 西日本常緑カシ林（広島）：東広島市鏡山の山頂付近に分布する常緑カシ林（ $34^{\circ}24' \text{N}$ 、 $132^{\circ}43' \text{E}$ 、標高320 m）を調査地とした（図-1.1d）。調査対象の林分は、1970年代後半から1980年代にかけて衰退したアカマツ林の跡地であり、その後自然再生した35年生前後のアラカシ優占林である。年平均気温は 13.5°C であり、年降水量は約1,446 mmである。推進費課題（B-073）により2007年 9月 23日に CO_2 フラックスの測定システムを設置して観測を開始後、2007年11月 1日より温暖化処理を行った。2020年7月20日に CH_4/CO_2 分析計（カナダABB社MGGA）を増設し、通年連続観測を行った。

5) 九州地方コジイ林（宮崎）：宮崎県宮崎市宮崎大学田野フィールドの約70年生常緑広葉樹二次林（コ



図-1.1. 温暖化操作実験サイト：(a) 最北端針広混交林サイト、(b) 東北地方冷温帯落葉広葉樹林サイト、(c) 関東地方衰退したアカマツ林サイト、(d) 西日本常緑カシ林サイト、(e) 九州地方コジイ林サイト、(f) 中国亜熱帯亜高山帯天然針葉樹林サイト、(g) 香港亜熱帯常緑広葉樹林、(h) 台湾熱帯常緑広葉樹林

ジイ林、31°51'N、131°18'E、標高130 m)を調査地とした(図-1.1e)。年平均気温は17.4°C、年降水量は2,509 mmである。推進費課題(B-073)により2008年12月中旬にCO₂フラックスの測定システムを設置し、2020年6月17日にCH₄/CO₂分析計(米国LI-COR社LI-7810)を増設し、CH₄/CO₂フラックスの通年連続観測を開始した。

6) 中国亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林(哀牢山)：哀牢山自然保護区(中国雲南省景東県)内中国科学院哀牢山亜熱帯森林長期モニタリングサイト(24°32'N, 101°01'E、標高2,480 m)を調査地とした(図-1.1f)。本調査地は天然常緑広葉樹林であり、年平均気温は11.0°C、年降水量は1,980 mmである。国際共同研究により2010年10月上旬に上記と同様のCO₂フラックスのシステムを設置し、2011年1月に温暖化操作実験を開始した。現地共同研究者は2017年3月20日にCH₄/CO₂分析計(米国LGR社UGGA)を増設し、CH₄/CO₂フラックスの通年連続観測を行っている。

7) 香港亜熱帯常緑広葉樹林：香港中文大学敷地内の常緑広葉樹二次林(22°25'N、114°12'E、標高23 m)を調査地とした(図-1.1g)。本サイトはアジアの亜熱帯地方に位置する。1991～2020年の年平均気温は23.5°Cであり、夏(5～10月)に平均で27.6°C、冬に平均で19.4°Cであった。年降水量は2,431 mmとなり、そのうちの約84%は夏に集中した。植生は1950年以降に天然更新された二次林であり、優先樹種は主に在来種のフカノキ(*Schefflera octophylla*)やナガバナキンハゼ(*Sapium discolor*)、*Aporosa dioica*などである。土壌は酸性(pH<5.0)であり、有機炭素と窒素含有率はそれぞれ3.3%と0.2%である。国際共同研究により2017年9月上旬に上記と同様のCO₂フラックスのシステムを設置した。また、現地共同研究者は2020年4月から温暖化操作実験を開始し、さらにCH₄/CO₂分析計(米国LGR社UGGA)を増設してCH₄/CO₂フラックスの通年連続観測を行った。

8) 台湾熱帯常緑広葉樹林：国立台湾大学演習林が所有する下坪熱帯植物園(23°46'N, 120°40'E、標高155 m)を調査地とした(図-1.1h)。本調査地は河川の沖積平野であり、年平均気温は23.4°C、年降水量は2,408 mmであった。樹種は主に1910年代に東南アジアから導入されたマホガニー(*Swietenia macrophylla*)、シチヨウジュ(*Alstonia scholaris*)、シマトネリコ(*Fraxinus formosana*)などである。国際共同研究により2018年10月下旬に上記と同様のCO₂フラックスのシステムを設置した。現地共同研究者は不定期的にCH₄/CO₂分析計(米国LGR社UGGA、他研究プロジェクトからの借入)を用いてCH₄フラックスの観測を行った(なお、本サイト設置用にカナダABB社MGGAを1台既に発注した)。また、2021年3月19日から温暖化操作実験を開始した。

9) マレーシアオイルパームプランテーション(オイルパーム)：マレーシア半島部ネグリスンビラン州にある低地熱帯天然林(3°01'N、102°18'E、標高90 m)を新規調査地とした。

(2) CH₄/CO₂フラックスに及ぼす気候変動および攪乱の影響の検出

(2-1) 観測・解析方法

国立環境研究所が開発・推進している世界最大規模のチャンバー観測ネットワークを用いて、北海道の最北端(北緯45°)から赤道付近のマレーシアまでの広域トランセクトに沿って、森林生態系における土壌呼吸の連続測定を実施した。観測結果に基づいて、気候変動や攪乱が各森林生態系の土壌炭素放出に与える影響を定量的に評価した。温暖化操作実験と同様の観測、解析手法を利用している。

日本国内の上記の温暖化操作実験5サイトに加え3サイト(天塩カラマツ植林・苫小牧カラマツ林台風跡地・富士北麓カラマツ成熟林)でチャンバー観測を行い、土壌CO₂フラックスに及ぼす環境要因の影響評価を行った。これら3サイトは、自然攪乱(苫小牧：2004年に台風による風倒害)と人為攪乱(天塩フラックス：2003年に皆伐、富士：2015年に間伐)を受けており、攪乱後の植生回復に伴う土壌CO₂フラックスの変化も評価した。「2-2006」の先行研究として、富士北麓カラマツ成熟林において2015年にCH₄/CO₂分析計(米国LGR社UGGA)を増設し、CH₄/CO₂フラックスの連続測定を行ってきた。一方、苫小牧カラマツ林台風跡地では2020年7月、天塩カラマツ植林では2020年10月にそれぞれCH₄/CO₂分析計(米国LI-COR社LI-7810、カナダABB社MGGA)を増設し、CH₄/CO₂フラックスの同時測定を開始した。

海外サイトに関しては、中国亜熱帯亜高山帯天然針広混交林と台湾亜熱帯スギ林において土壌CO₂フラックス、およびマレーシア低地熱帯天然林において土壌CH₄/CO₂フラックスの季節・経年変化に及ぼす環境要因の影響評価を行った。測定のプロトコル及びCH₄/CO₂フラックス解析は、上記の温暖化操作

実験サイトと同一の手法を用いた。

(2-2) 観測サイトの概要 (図-1.2)

1) 天塩カラマツ植林 (天塩フラックス) : 本サイトは2003年に天然冷温帯針広混交林を皆伐した後、植林された若齢カラマツ植林地 (45°03'N、142°06'E、標高66 m) であり、カラマツの成長に伴う土壌呼吸量の変化を明らかにすることを目的として、植林初期の2003年に観測を開始した (図-1.2a)。カラマツに加えて、下層植生のササや天然更新した若齢シラカンバが優占している。年平均気温は5.5°Cであり、年降水量は 1,115 mmである。根の影響を排除した微生物呼吸量を観測するため、根を除去していない対照区 (5反復) に加え、2015年に根切区 (5反復) を設定した。2020年10月にCH₄/CO₂分析計 (カナダABB社MGGA) を増設して、根雪となる12月1日までCH₄/CO₂フラックスの連続観測を行った。

2) 苫小牧カラマツ林台風跡地 (苫小牧) : 本サイトでは、2000年 (当時約45年生のカラマツ林) にチャンバー観測を開始した (42°44'N、141°31'E、標高125 m)。年平均気温は7.5°Cであり、年降水量は1,228 mmである。2004年の台風18号によって90%以上のカラマツが倒壊した。倒木を除去した後に、自然の植生遷移に伴う土壌呼吸量と微生物呼吸量の変化を明らかにすることを目的として、観測を継続してきた (図-1.2b)。また、2010年のチャンバーシステム更新に際し、対照区 (5反復) と根切区 (5反復) と林床植生区 (5反復) を設置し直し、CO₂フラックスの観測を継続した。さらに、2020年7月9日にCH₄/CO₂分析計 (米国LI-COR社LI-7810) を増設し、根雪となる11月末までCH₄/CO₂フラックスの同時観測を行った。

3) 富士北麓カラマツ成熟林 (富士) : 本サイト (35°26' N、138°45' E、標高1,100 m) では、2006年 (当時約50年生のカラマツ成熟林) より24基のチャンバーを対照区 (8反復)、根切区 (8反復) と林床植生区 (8反復) として設置し、無積雪期にCO₂フラックスの連続観測を行った (図-1.2c)。林床にはオシダが優占している。年平均気温は8.6°Cであり、年降水量は 1,848 mmである。2014年から2015年にかけて、林分の1/3で間伐を行った。また、2015年4月18日にCH₄/CO₂分析計 (米国LGR社UGGA) を増設して、CH₄/CO₂フラックスの同時観測を行ってきた。

4) 中国亜熱帯亜高山帯天然針葉樹林 : 中国科学院昆明植物研究所麗江高山植物園 (雲南省麗江市、自然保護区) 構内の天然針葉樹林 (27°08' N、100°13' E、標高3,188 m) を調査地とした (図-1.2d)。本調査地は中国南部雲南省に位置するが、亜高山帯に位置しているため、年平均気温は9.1°C、年降水量は1,160 mmとなっている。国際共同研究の一環で、2014年8月上旬に温暖化操作実験サイトとして観測機器を設置し (各処理区5反復)、土壌CO₂フラックスの通年連続観測を行った。2019年の末に温暖化操作実験を停止し、土壌CO₂フラックスの通常観測を継続してきた。

5) 台湾亜熱帯スギ林 : 台湾大学附属溪頭演習林の約80年生スギ林を調査地とした (23°40' N、120°48' E、標高1,250 m) (図-1.2e)。本調査地は亜熱帯に属しており、年平均気温は16.6°Cであり、年降水量は2,635 mmである。2011年に対照区 (6反復) と根切区 (6反復) のCO₂フラックスの通年連続観測を開始した。

6) マレーシア低地熱帯天然林 : マレーシア半島部ネグリシンプラン州にあるパソ保護林内の低地熱帯天然林を調査地とした (2°58'N、102°18'E、標高100 m)。年平均気温は25.3°Cであり、年降水量は 1,865

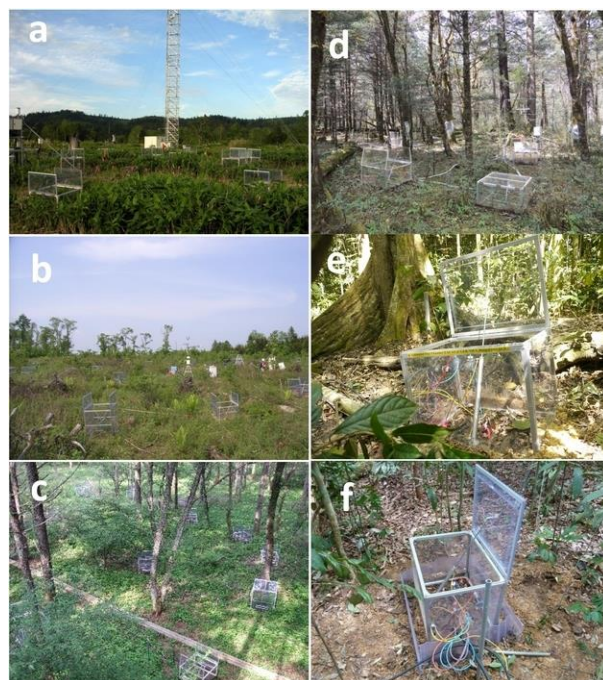


図-1.2. 気候変動・攪乱サイト: (a) 天塩カラマツ植林サイト、(b) 苫小牧カラマツ林台風跡地サイト、(c) 富士北麓カラマツ成熟林サイト、(d) 中国亜熱帯亜高山帯天然針葉樹林サイト、(e) 台湾亜熱帯スギ林サイト、(f) マレーシア低地熱帯天然林サイト

mmである(図-1.2f)。2010年より、対照区(8反復)と根切区(8反復)のCO₂フラックス通年連続観測を行っている。2015年12月にCH₄/CO₂分析計(米国LGR社UGGA)を増設して、CH₄/CO₂フラックスの同時観測を開始した。

4. 結果及び考察

(1) 温暖化操作実験による土壌有機炭素放出の温暖化影響及びフィードバック効果の定量評価

(1-1) 最北端針広混交林(天塩温暖化)

本サイトは、CO₂分析計に関しては2-1705課題で設置したものを継続的に利用していたが、メタン分析計に関しては2020年5月に設置し、以降2022年度まで土壌CO₂/CH₄フラックスの無雪期連続観測を行った。積雪期のCO₂フラックスは地温との関係より推定した。2020年から2022年における地温と土壌水分、土壌CO₂/CH₄フラックスに関する季節変動を図-1.3に示す。

土壌呼吸、微生物呼吸と温暖化した微生物呼吸の年平均値は2.94~2.97、1.77~1.89、3.79~4.03 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、年積算値はそれぞれ、11.1~11.2、6.69~7.14および14.3~15.3 $\text{t C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であった。本サイトのCO₂フラックスは、すべての処理区で地温の上昇とともに指数関数的に増加した、一方、2021年から2022年にかけて、温度で標準化したCO₂フラックスは土壌水分の増加によって線形に減少する傾向が認められた。本サイトは湿潤泥炭地であるため、地下水位が上昇して土壌水分が高くなると、好気的狀態にある土壌炭素量が減少し、CO₂フラックスも少なくなると考えられた。2020年から2022年までの対照区、根切区、温暖化区のCH₄フラックス(吸収の場合はマイナスの値、放出の場合はプラスの値とする)の年平均値は-2.43~-1.53、-1.04~-0.53及び-2.13~-1.49 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。また、2020年から2022年におけるCH₄フラックスの年積算値はそれぞれ-12.2~-7.7、-4.4~-2.7、-10.7~7.5- $\text{kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であった。湿潤泥炭土壌においても、無雪期を通してメタンを吸収していたが、量としては、2-2006課題におけるサイトの中では小さいものであった。降雨によって土壌に蓄積されたメタンが短時間に大量に放出される現象も観察された。季節変化の中で、地温の上昇および土壌水分の低下によってCH₄フラックスが上昇する傾向が毎年見られた(図-1.4)。特に土壌水分とCH₄フラックスの関係は強く、温暖化区では温度上昇に伴う土壌水の蒸発促進によって、根の存在する対照区では根からの吸水によって、土壌水分が根切区よりも少なくなりCH₄フラックスが増加すると考えられた。2020年から2022年における昇温1°C当たりのCO₂/CH₄フラックスへの温暖化効果はそれぞれ、+31.6~+52.5%、+37.6~+56.2%であった。

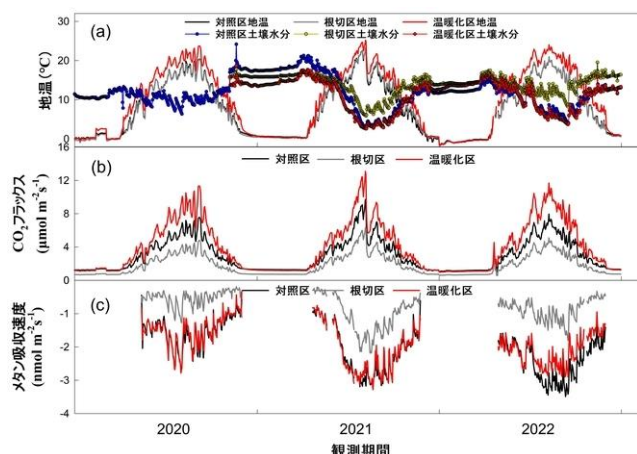


図-1.3. 最北端針広混交林における (a) 地温と土壌水分、(b) 土壌CO₂フラックス及び(c) メタン吸収速度の季節変動

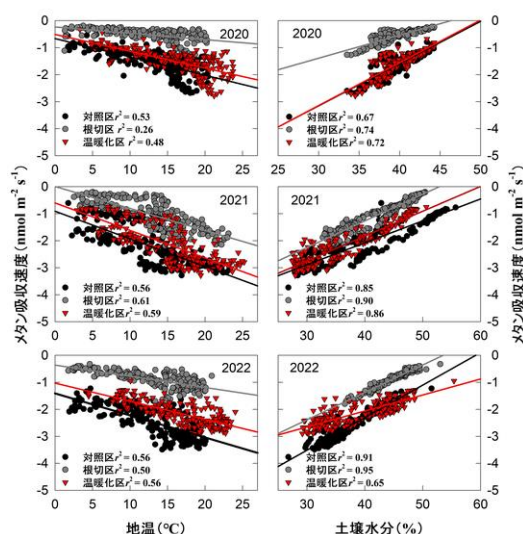


図-1.4. 最北端針広混交林における年別のメタン吸収速度と地温(左)および土壌水分(右)との関係

特に土壌水分とCH₄フラックスの関係は強く、温暖化区では温度上昇に伴う土壌水の蒸発促進によって、根の存在する対照区では根からの吸水によって、土壌水分が根切区よりも少なくなりCH₄フラックスが増加すると考えられた。2020年から2022年における昇温1°C当たりのCO₂/CH₄フラックスへの温暖化効果はそれぞれ、+31.6~+52.5%、+37.6~+56.2%であった。

(1-2) 東北地方冷温帯落葉広葉樹林(白神山地)

本サイトでは、CO₂分析計に関しては2-1705課題で設置したものを継続的に利用していたが、メタン分析計に関しては2020年8月に設置し、以降2022年度まで土壌CO₂/CH₄フラックスの無積雪期連続観測を毎シーズン行った。2020年から2022年における地温と土壌水分、土壌CO₂/CH₄フラックスに関する季節変動を図-1.5に示す。土壌呼吸、微生物呼吸と温暖化した微生物呼吸の年平均値は3.83~4.56、3.07~3.38、4.45~5.40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、年積算値はそれぞれ、14.5~17.2、11.63~12.81 および 16.8~20.5 $\text{t C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であった。本サイトのCO₂フラックスも地温に強く依存しており、地温とCO₂フラックスの間には明確な指数関数的な関係性が見られた。また、本サイトでは例年梅雨末期の7月下旬から8月にかけて降水量が多く土壌は湿潤であり、CO₂フラックスがピークとなる土壌水分環境が認められた。しかし、2020年は例年と異なり夏季乾燥し、CO₂フラックスと土壌水分との間には正の相関が見られた。

一方で、2020年から2022年までの対照区、根切区、温暖化区のCH₄フラックスの年平均値は-5.46~-3.17、-3.82~-1.94及び-4.81~-3.08 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。また、2020年から2022年におけるメタン吸収に関する年積算値はそれぞれ-27.6~-16.0、-19.3~-9.8、-24.3~-15.5 $\text{kg CH}_4 \text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であった。メタン吸収量としては、2-2006課題における他のサイトと比較するとやや大きめであり、特に夏季降水量が少なかった2021年において非常に大きなCH₄フラックスが認められた。これは、2021年夏季に乾燥状態であったことが関係していたが、それに加えて土壌水分に対するCH₄フラックスの感度が大きかったことも影響していた(図-1.6右)。年別に地温とCH₄フラックスとの関係性を見ると、2021年に地温に対しては正の相関が見られるが、2022年にはほとんど相関は見られなかった(図-1.6左)。2021年は土壌温度が高温となる夏季に土壌水分が小さかったため、CH₄フラックスと土壌温度との間に疑似的な相関が見られた可能性がある。2020年から2022年における昇温1°C当たりの土壌CO₂フラックスとCH₄フラックスへの温暖化効果はそれぞれ、+17.5~+33.3%、+8.8~+24.7%であった。

(1-3) 関東地方衰退したアカマツ林(つくば)

本サイトでは、CO₂分析計に関しては2-1705課題で設置したものを継続的に利用し

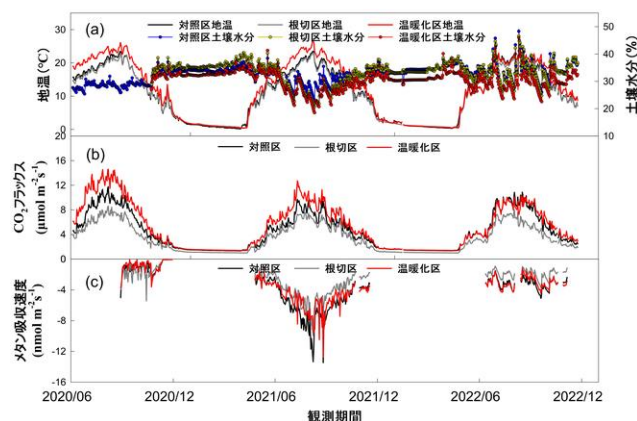


図-1.5. 東北地方冷温帯落葉広葉樹林 (a) 地温と土壌水分、(b) 土壌CO₂フラックスおよび(c) メタン吸収速度に関する季節変動

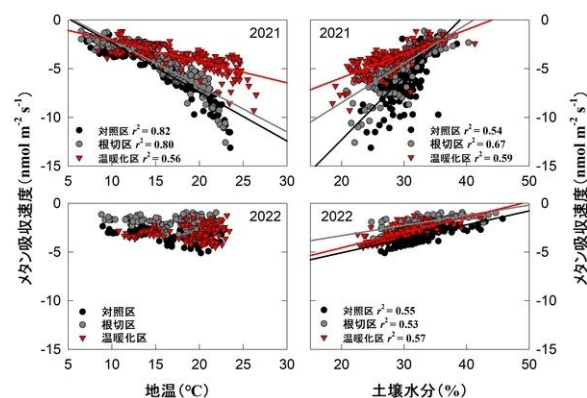


図-1.6. 東北地方冷温帯落葉広葉樹林における年別のメタン吸収速度と地温(左)および土壌水分(右)との関係

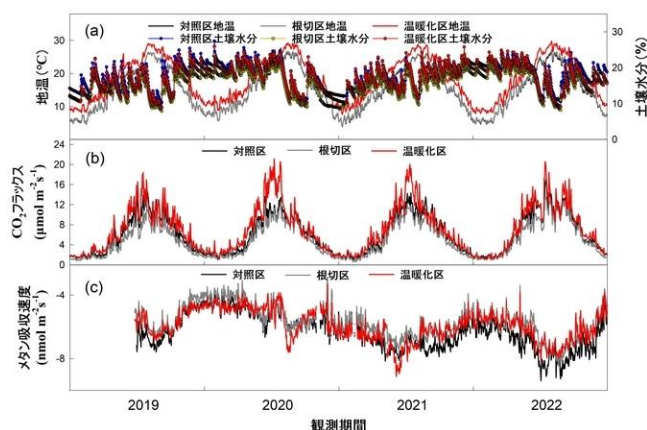


図-1.7. 関東地方衰退したアカマツ林における (a) 地温と土壌水分、(b) 土壌CO₂フラックス、(c) メタン吸収速度に関する季節変動

ていたが、メタン分析計に関しては2019年7月に設置し、以降2022年度まで土壌CO₂/CH₄フラックスの通年連続観測を継続した。2019年から2022年における地温と土壌水分、CO₂/CH₄フラックスに関する季節変動を図-1.7に示す。土壌呼吸、微生物呼吸と温暖化した微生物呼吸の年平均値は5.65~6.74、4.42~5.68、6.70~7.34 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、年積算値はそれぞれ、21.4~25.5、16.7~21.5および25.4~27.8 $\text{t C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であった。本サイトのCO₂フラックスは地温に強く依存しており、地温とCO₂フラックスの間には明確な指数関数的な関係性が見られた。また、本サイトでは例年7月から8月にかけて短期的に乾燥影響を受けるため、土壌水分とCO₂フラックスの間にもある程度関係性が認められた。しかしながら2021年は例外的に夏季に降水量が多く、土壌水分とCO₂フラックスの関係性は他の年と比べて相対的に弱いものとなった。

一方で、2019年から2022年までの対照区、根切区、温暖化区のCH₄フラックスの年平均値は-6.95~-5.20、-6.14~-4.91及び-6.56~-5.16 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。また、2019年から2022年におけるメタン吸収に関する年積算値はそれぞれ-35.1~-26.2、-30.6~-24.8、-33.1~-26.1 $\text{kg CH}_4 \text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であった。メタンの吸収量としては、2-2006課題における他のサイトと比較しても、本サイトにおける土壌のメタン吸収量は大きなものであった。これに関しては、本サイトの土壌が黒ボク土であることが大きく関係したものと考えられる。年別に地温および土壌水分とCH₄フラックスとの関係性を見ると、概ね地温に対しては負の相関（図-1.8左）、土壌水分に対しては正の相関を示した（図-1.8右）。しかし、2021年に関しては夏季の降水量が多かった影響か、土壌水分とCH₄フラックスとの関係性は他の年に比べて弱かった。2019年から2022年における昇温1°C当たりの土壌CO₂とCH₄フラックスへの温暖化効果はそれぞれ、+10.4~+16.8%、+0.6~+2.3%であった。

(1-4) 西日本常緑カシ林（広島）

本サイトでは、CO₂分析計に関しては2-1705課題で設置したものを継続的に利用していたが、メタン分析計に関しては2020年7月に設置し、以降2022年度まで土壌CO₂フラックスおよびCH₄フラックスの通年連続観測を継続した。2020年から2022年における地温と土壌水分、CO₂フラックス、CH₄フラックスに関する季節変動を図-1.9に示す。土壌呼吸、微生物呼吸と温暖化した微生物呼吸の年平均値は5.34~6.26、3.81~4.38、4.54~5.14 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

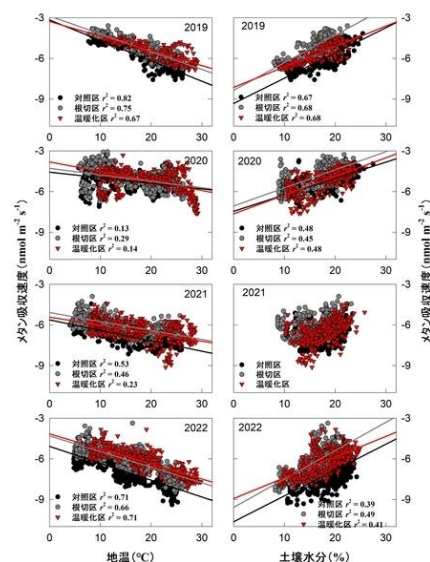


図-1.8. 関東地方衰退したアカマツ林における年別のメタン吸収速度と地温（左）および土壌水分（右）との関係

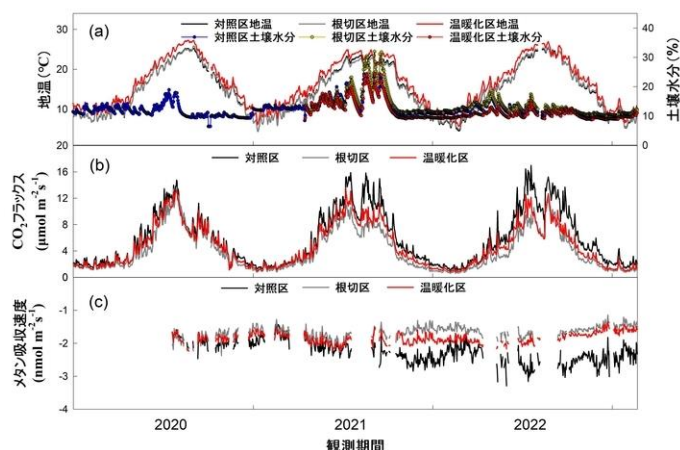


図-1.9. 西日本常緑カシ林における (a) 地温と土壌水分、(b) CO₂フラックス、(c) メタン吸収速度に関する季節変動

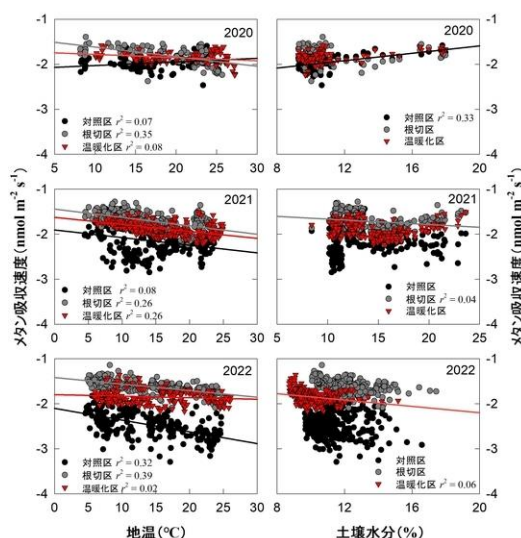


図-1.10. 西日本常緑カシ林における年別のメタン吸収速度と地温（左）および土壌水分（右）との関係

¹であり、年積算値はそれぞれ、20.2～23.7、14.4～16.6および17.2～19.5 t C ha⁻¹ yr⁻¹であった。本サイトのCO₂フラックスは地温に強く依存した、例年7月下旬から8月にかけて降水量が少ない時期があり、乾燥ストレスによって一時的にCO₂フラックスが減少する傾向が見られた。乾燥ストレスの影響が最も強かった（8月の降水量が3年間で最も少なかった）2020年には、土壌水分と各CO₂フラックスの相関は他の2年と比較して相対的に強くなった。

一方で、2020年から2022年までの対照区、根切区、温暖化区のCH₄フラックスの年平均値は-2.46～-1.96、-1.80～-1.63及び-1.88～-1.85 nmol m⁻² s⁻¹であった。また、2020年から2022年におけるメタン吸収に関する年積算値はそれぞれ-12.4～-9.9、-9.1～-8.2、-9.5～-9.3 kg CH₄ ha⁻¹ yr⁻¹であった。メタンの吸収量としては、2-2006課題における他のサイトと比較しても小さいものであった。加えて本サイトの特徴は、CH₄フラックスに明確な季節変動が見られなかったことである（図-1.9c）。年別に地温および土壌水分とCH₄フラックスとの関係性を見ても、概ね温度に対して負の相関を示したものの（図-1.10左）、土壌水分との関係性は概して弱いものであった（図-1.10右）。上記の通り、本サイトでは全体的にCH₄フラックスの変動に対する地温や土壌水分の影響が小さい傾向となった。2020年から2022年における昇温1℃当たりの土壌CO₂フラックスとCH₄フラックスへの温暖化効果はそれぞれ、+6.0～+13.6%、+1.6～+9.7%であった。

(1-5) 九州地方コジイ林（宮崎）

本サイトでは、CO₂分析計に関しては2-1705課題で設置したものを継続的に利用していたが、メタン分析計に関しては2020年6月に設置し、以降2022年度まで土壌CO₂/CH₄フラックスの通年連続観測を継続した。2020年から2022年における地温と土壌水分、土壌CO₂/CH₄フラックスに関する季節変動を図-1.11に示す。土壌呼吸、微生物呼吸と温暖化した微生物呼吸の年平均値は3.84～4.00、3.15～3.47、3.38～3.91 μmol m⁻² s⁻¹であり、年積算値はそれぞれ、14.5～15.1、11.9～13.3および12.8～14.8 t C ha⁻¹ yr⁻¹であった。本サイトのCO₂フラックスは地温に強く依存したが、例年7月下旬から8月にかけて降水量が少ない時期があり、乾燥ストレスによって一時的にCO₂フラックスが減少する傾向が見られた。その傾向は夏期の乾燥が強かった2020年に顕著に表れた。

一方で2020年から2022年までの対照区、根切区、温暖化区のCH₄フラックスの年平均値は-3.85～-3.19、-2.46～-2.19及び-3.51～-2.70 nmol m⁻² s⁻¹であった。また、2020年から2022年におけるメタン吸収に関する年積算値はそれぞれ-19.4～-16.1、-12.1～-11.1、-17.1～-13.6 kg CH₄ ha⁻¹ yr⁻¹であった。本サイトにおいてもCH₄フラックスに明確な季節変動が見られなかった（図-1.11c）。年別に地温および土壌水分とCH₄フラックスとの関係性を見ても、温度に対して相関関係は示されなかったが（図-1.12左）、土壌水分とは有意な相関が認められた（図-1.12右）。土壌水分が少ないほど（＝土壌が乾いているほど）、CH₄フラックスは大きくなった。

2020年から2022年における昇温1℃当たりのCO₂フラックスとCH₄フラックスへの温暖化効果はそれぞれ

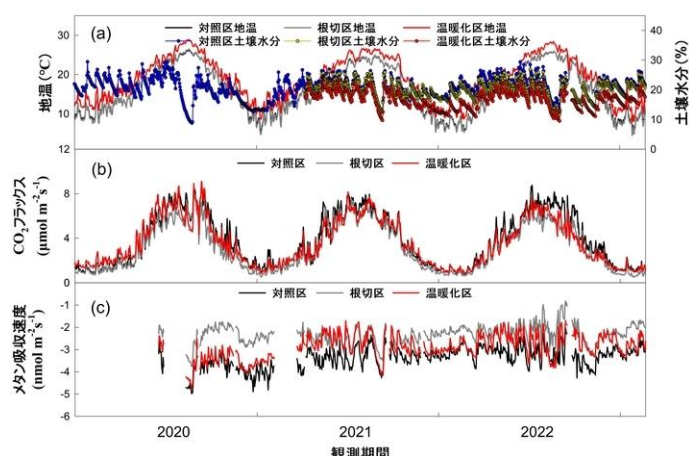


図-1.11. 九州コジイ林における (a) 地温と土壌水分、(b) 土壌CO₂フラックスと (c) メタン吸収速度に関する季節変動

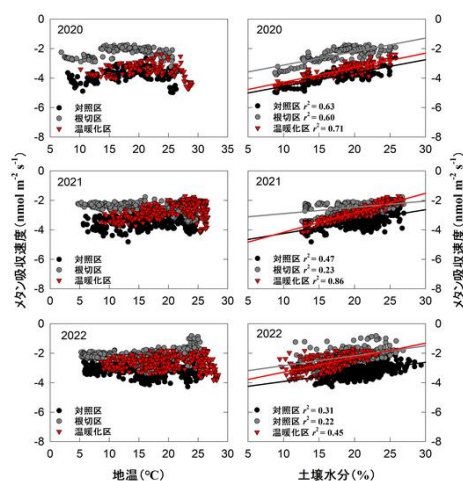


図-1.12. 九州コジイ林における年別のメタン吸収速度と地温（左）および土壌水分（右）との関係

れ、+2.8~+9.6%、+5.3~+18.5%であり、CH₄フラックスのほうがより温暖化の影響が大きいことが示された。この3年間の平均値で温暖化区は対照区より地温は2.6℃高くなっていたが、それに対応してCO₂フラックスは1.13倍、CH₄フラックスは1.27倍増加していた。また温暖化効果の年変動もCH₄フラックスの方が大きかった。よってCH₄フラックスは今後に予測される環境変動の影響をより感受性高く受ける可能性が示唆された。

(1-6) 中国亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林(哀牢山)

本サイトでは、2017年から2022年における約6年間の観測データが得られている。CO₂分析計に関しては2-1705課題で設置したものを継続的に利用していたが、メタン分析計に関しては2017年3月に設置し、以降2022年度まで土壌CO₂フラックスとCH₄フラックスの通年連続観測を継続したが、2019年以降メタン分析計が不調のため度々欠測が生じた。6年間の地温、土壌水分、土壌CO₂フラックス及びCH₄フラックスに関する季節変動を図-1.13に示す。土壌水分は夏に高く冬に低い傾向が見られた。3つの処理区のCO₂フラックスは地温に強く依存した一方で、土壌水分とも弱い相関が見られた。2017年~2022年まで対照区、根切区、温暖化区のQ₁₀値はそれぞれ3.63~5.23、3.62~4.73および3.18~4.55であった。土壌呼吸、微生物呼吸と温暖化した微生物呼吸の年平均値は3.37~4.06、2.80~3.45、3.56~3.98 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、年積算値はそれぞれ、12.8~15.4、10.6~13.0および13.5~15.1 $\text{t C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であった。

一方で、観測期間中メタンは常に土壌に吸収されており、CH₄フラックスは冬に上昇、夏に低下する傾向を示した(図-1.13c)。2017年から2022年までの対照区、根切区、温暖化区のCH₄フラックスの年平均値は-3.36~-1.92、-2.99~-1.31及び-3.06~-1.37 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。また、2017年から2022年におけるメタン吸収に関する年積算値はそれぞれ-17.0~-9.6、-15.1~-6.6、-15.4~-6.9 $\text{kg CH}_4 \text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であった。観測期間で対照区のメタン吸収量が根切区より21%大きかった。また2017年から2022年まで温暖化区のメタン吸収量は根切区と比べて14%増加した。各観測年において、CH₄フラックスは地温との相関がほぼ見られなかったが(2022年を除く)、土壌水分とは強い正の相関が見られた(図-1.14)。2017年から2022年における昇温1℃当たりの土壌CO₂フラ

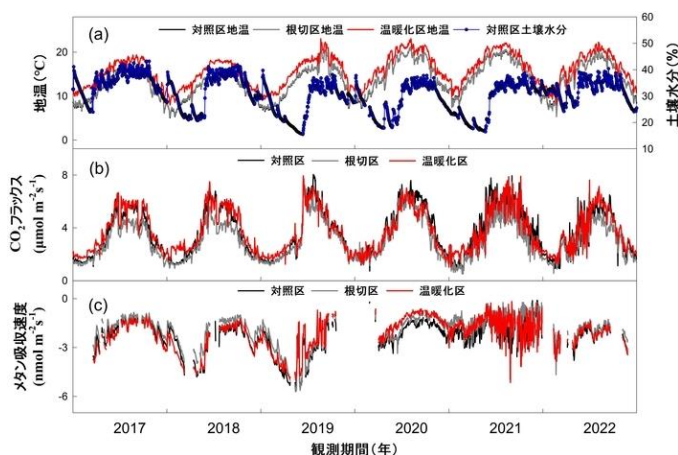


図-1.13. 中国亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林における地温と土壌水分 (a)、土壌CO₂フラックス (b) およびメタン吸収速度 (c) に関する季節変動

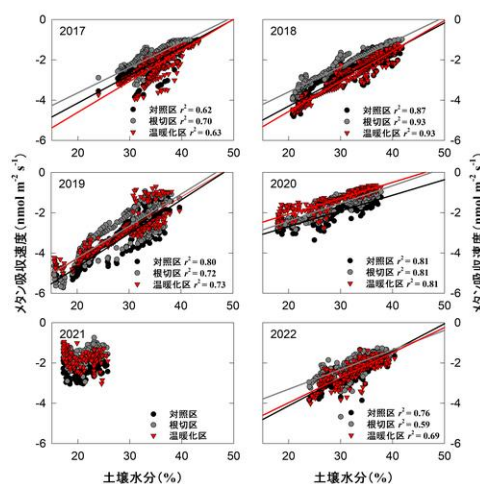


図-1.14. 中国亜熱帯亜高山帯天然常緑広葉樹林における年別の土壌メタン吸収速度と土壌水分の関係

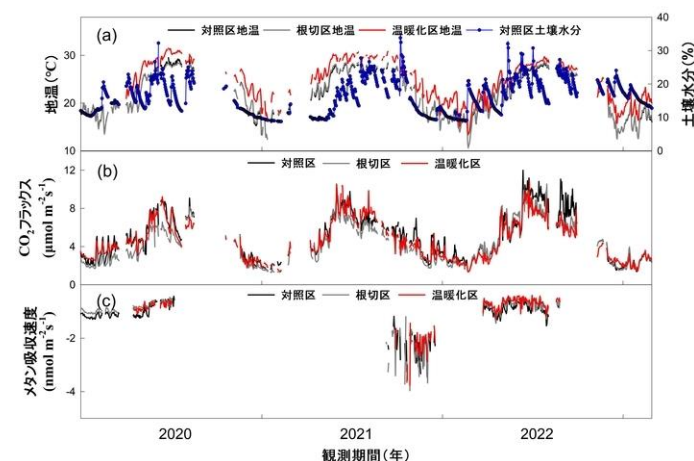


図-1.15. 香港亜熱帯常緑広葉林における (a) 地温と土壌水分、(b) 土壌CO₂フラックス及び (c) メタン吸収速度に関する季節変動

クス及びCH₄フラックスへの温暖化効果はそれぞれ、+3.8~+14.6%、+1.4~+14.6%であった。

(1-7) 香港亜熱帯常緑広葉林（香港）

本サイトでは、2020年から2022年まで土壌CO₂フラックスとCH₄フラックスの通年連続観測を継続した。メタン計が不調のため、CH₄フラックスの欠測が多発した。観測期間における地温と土壌水分、土壌CO₂フラックス及びCH₄フラックスに関する季節変動を図-1.15に示す。地温が明瞭な季節変化をしており、土壌水分は夏に低下する傾向が見られ、2020年の乾燥期間が最も長かった。観測期間における土壌呼吸、微生物呼吸と温暖化した微生物呼吸の年平均値は4.64~5.43、2.95~3.92、4.84~5.42 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、年積算値はそれぞれ、17.5~20.6、11.1~14.8および18.3~19.0 $\text{t C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であった。微生物呼吸と根呼吸が土壌呼吸に占める割合がそれぞれ、68%および32%であった。毎年各処理区のCO₂フラックスは地温に強く依存していたが、2020年は乾燥期間が長かったため、降雨による土壌水分の増加がCO₂フラックスを増進した。

一方で、2020年から2022年までの対照区、根切区、温暖化区のCH₄フラックスの年平均値は-0.75~-0.12、-0.62~-0.10及び-1.10~-0.58 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。また、2020年から2022年におけるCH₄吸収に関する年積算値はそれぞれ-5.7~-3.8、-5.1~-3.1、-5.9~-2.9 $\text{kg CH}_4 \text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であった。対照区のメタン吸収量が根切区より14%が大きかった。温暖化区のメタン吸収量が根切区と比べて2020年に15%増加したが、2022年には6%減少した。本サイトのメタン吸収量は他のサイトと比較して最も小さかった。これに関しては、本サイトの豊富な降水量が大きく関係したものと考えられる。年別に見ると、CH₄フラックスと地温との相関は見られなかった一方で、2022年にはCH₄フラックスと土壌水分との間に正の相関が確認された（図-1.16）。2020年から2022年における昇温1°C当たりの土壌CO₂フラックスとCH₄フラックスへの温暖化効果はそれぞれ、+13.1~+15.9%と-3.5~+3.3%であった。

(1-8) 台湾熱帯常緑広葉樹林（台湾熱帯林）

本サイトでは、CO₂分析計に関しては2-1705課題で設置したものを継続的に利用していた。CO₂フラックスの観測は通年であるが、CH₄フラックスの観測は他機関から借り入れたメタン分析計を用いて不定期に行った。本サイトにおける温暖化操作実験は2021年3月に開始した。2020年から2022年における地温と土壌水分、土壌CO₂フラックス及びCH₄フラックスに関する季節変動を図-1.17に示す。観測期間における処理ごとのCO₂フラックスは明瞭な季節変化を示し、夏に最大と

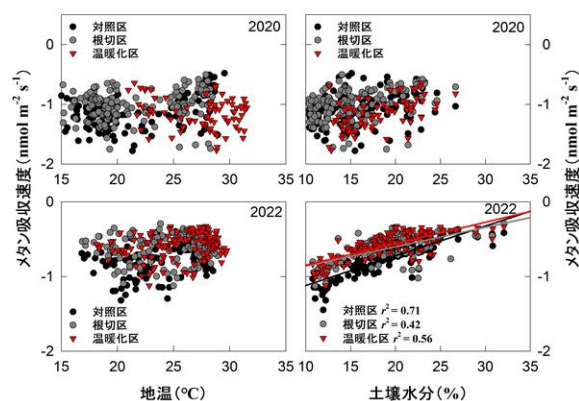


図-1.16. 香港亜熱帯常緑広葉林における年別の土壌メタン吸収速度地温（左）および土壌水分（右）との関係

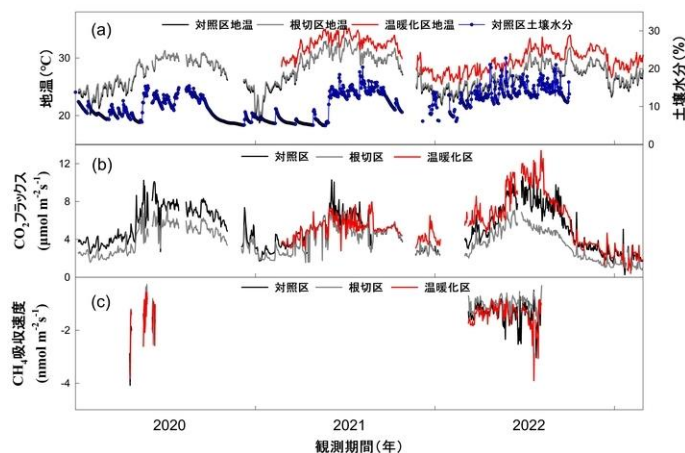


図-1.17. 台湾熱帯常緑広葉樹林における (a) 地温と土壌水分、(b) 土壌CO₂フラックス及びメタン吸収速度 (c) に関する季節変動

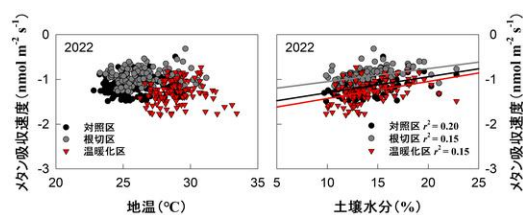


図-1.18. 台湾熱帯常緑広葉樹林における年別の土壌メタン吸収速度と地温（左）および土壌水分（右）との関係

なった。3年間の土壌呼吸、微生物呼吸と温暖化した微生物呼吸年平均値は4.55～5.58、3.74～4.03、5.05～6.53 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、年積算値はそれぞれ、17.21～21.24、14.17～15.23および19.10～24.71 $\text{t C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であった。微生物呼吸は土壌呼吸の75%を占めた。毎年各処理区の CO_2 フラックスは地温の上昇に伴って指数関数的に増加した一方で、2021年から2022年にかけて温度標準化した CO_2 フラックスは土壌水分と弱い相関が見られた。土壌呼吸、微生物呼吸及び温暖化した微生物呼吸の Q_{10} 値はそれぞれ2.6～3.45、2.44～3.88と1.86～3.38である。

一方で、2022年に注目すると、処理区ごとの CH_4 フラックスの季節変化は明瞭ではないものの、土壌水分の低下に伴って上昇する傾向が見られた。対照区、根切区と温暖化区の CH_4 フラックスの年平均値（平均値±標準偏差）はそれぞれ -1.34 ± 0.28 、 -1.00 ± 0.48 と $-1.41 \pm 0.15 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。 CH_4 フラックスと土壌水分の間には正の相関が認められたが、 CH_4 フラックスと地温と間の関係性は認められなかった（図-1.18）。また、年積算値はそれぞれ -6.7 ± 1.0 、 -5.1 ± 1.4 と $-7.1 \pm 0.6 \text{ ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であり、根切区のメタン吸収量は対照区や温暖化区より小さいものであった。温暖化区では蒸発が増進することで、対照区では根からの吸水によって、土壌水分が根切区よりも低くなり、 CH_4 フラックスが増加すると考えられた。2021年から2022年における昇温 1°C 当たりの土壌 CO_2 フラックスと CH_4 フラックスへの温暖化効果はそれぞれ、 $+8.2 \sim +28.1\%$ 、 $+15.4\%$ であった。

（2） CH_4/CO_2 フラックスに及ぼす気候変動および攪乱の影響の検出

（2-1）天塩カラマツ植林（天塩フラックス）

本サイトでは、 CO_2 分析計に関しては2-1705課題で設置したものを継続的に利用していたが、 CH_4 分析計に関しては2020年10月に設置し、以降2022年度まで土壌 CO_2/CH_4 フラックスの無雪期連続観測を行った。積雪期の CO_2 フラックスは地温との関係より推定した。2020年から2022年における地温と土壌水分、土壌 CO_2 フラックス、土壌 CH_4 フラックスに関する季節変動を図-1.19に示す。

2020年から2022年までの土壌呼吸と微生物呼吸の年平均値は4.35～4.60、および2.33～2.87 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、年積算値はそれぞれ、16.5～17.4および8.81～10.9 $\text{t C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であった。本サイトの土壌 CO_2 フラックスは、両処理区とも地温の上昇とともに指数関数的に増加した、一方、温度で標準化した CO_2 フラックスと土壌水分の間には明瞭な関係が認められなかった。

2021年から2022年までの対照区と根切区の CH_4 フラックスの年平均値は $-2.21 \sim -1.54$ 及び $-1.67 \sim -0.91 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。また、 CH_4 吸収の年積算値は $-11.1 \sim -7.8$ 、および $-8.4 \sim -4.6 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ であった。 CH_4 の吸収量としては、対照区は天塩温暖化サイトと同等であったが、根切区では天塩温暖化サイトの2倍程度の吸収量が観測された。土壌の湿潤状態による影響と考えられる。季節変化の中で、地温の上昇および土壌水分の低下によって CH_4 フラックスが上昇する傾向が毎年見られた（図-1.20）。特に土壌水分と CH_4 フラックスの関係は強く、対象区では根からの吸水によって、土壌水分が根切区よりも少なくなり CH_4 フラックスが増加すると考え

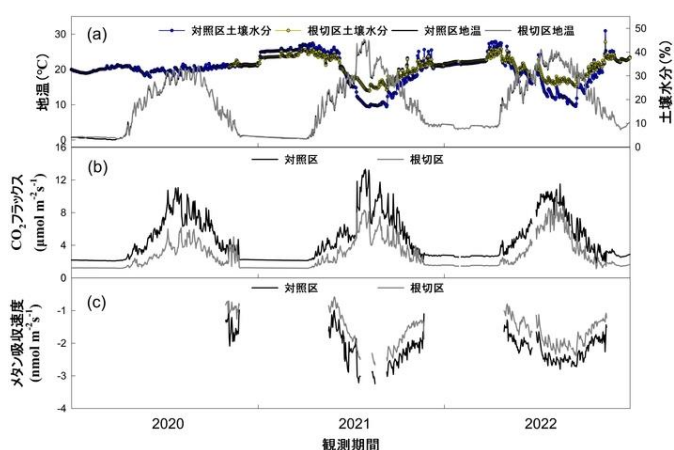


図-1.19. 天塩カラマツ植林における（a）地温と土壌水分、（b）土壌 CO_2 フラックス、（c）土壌メタン吸収速度の季節変動

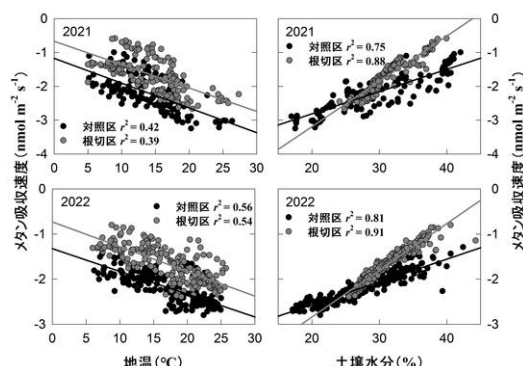


図-1.20. 天塩カラマツ植林における年別の土壌メタン吸収速度と地温（左）および土壌水分（右）との関係

られた。2021年から2022年における根が存在することによるCO₂フラックスとCH₄フラックスの増加効果はそれぞれ、+56～+63%、+30～+33%であった。

(2-2) 苦小牧カラマツ林台風跡地(苦小牧)

本サイトは樹齢20年程度のシラカンバ(落葉広葉樹)が優占する若齢林で、対照区、根切区、林床植生区(主にオオアワダチソウ)で観測を行った。また、11月下旬～4月中旬の積雪期にはフラックス観測を中断した。

観測期間の地温の季節変化は3処理区で同様であったが、土壌水分は植物による蒸散・吸水が旺盛であった植生区で低かった。対照区と根切区の土壌CO₂フラックスは明瞭な季節変化を示し、夏季に最大となった(図-1.21b)。一方、林床植生区の正味CO₂交換速度(NEE)は変動が大きいものの、その季節変化は土壌CO₂フラックスの季節変化と同様であった。NEEから推定した総光合成と生態系呼吸も、それぞれ夏季に最大となった。地温との良好な関係性を用いて欠測期間(冬季も含む)も含めて推定したCO₂フラックスの年積算値(平均値±標準偏差)は、土壌呼吸(対照区)、微生物呼吸(根切区)およびNEE(林床植生区)で、それぞれ 6.5 ± 0.66 、 5.0 ± 0.98 、 4.1 ± 0.69 tC ha⁻¹ yr⁻¹となり、微生物呼吸が土壌呼吸の77%を占めた。なお、土壌呼吸と微生物呼吸の温度反応(Q₁₀)は、それぞれ 2.93 ± 0.25 、 2.85 ± 0.19 であり、ほぼ等しかった。一方、2021年に乾燥条件で少しフラックスが低下する傾向がみられたが、土壌水分の影響はほとんど認められなかった。

本サイトの土壌がメタン吸収源であることが確認された。土壌CH₄フラックスの季節変化はCO₂フラックスほど明瞭ではないが、降水量が減少した夏季に上昇する傾向がみられた(図-1.21c)。地温および土壌水分と土壌CH₄フラックスの関係では、対照区と根切区では、地温とは負、土壌水分とは正の直線関係(図-1.22)が認められた。地温との関係は地温と土壌水分の間の負の相関関係に起因している可能性がある。なお、林床植生区で土壌CH₄フラックスの季節変化が大きく、地温や土壌水分との関係性がばらついていることは、植生のフェノロジーが影響していることを示唆している。土壌CH₄フラックスの観測期間の平均値は、対照区、根切区および林床植生区で、それぞれ -2.48 ± 0.09 、 -2.32 ± 0.10 、 -3.32 ± 0.22 nmol m⁻² s⁻¹となり、CH₄吸収量は植生区>対象区>根切区であった。

(2-3) 富士北麓カラマツカラマツ成熟林(富士)

本サイトはカラマツ(落葉針葉樹)の成熟林であり、2015年から対照区、根切区、林床植生区で無積雪期に土壌CH₄フラックスの連続観測を行ってきたが、2022年にはメタン分析計の不調のため長期の欠測期間が生じた。

対照区と根切区の土壌CO₂フラックス、および植生区の正味CO₂交換速度(NEE)は明瞭な季節変化を示し、夏季に最大となった(図-1.23)。冬季も含む欠測期間の推定結果を加えて計算した8年間のCO₂フラックスの年積算値(平均値±標準偏差)は、土壌呼吸(対照区)、微生物呼吸(根切区)およ

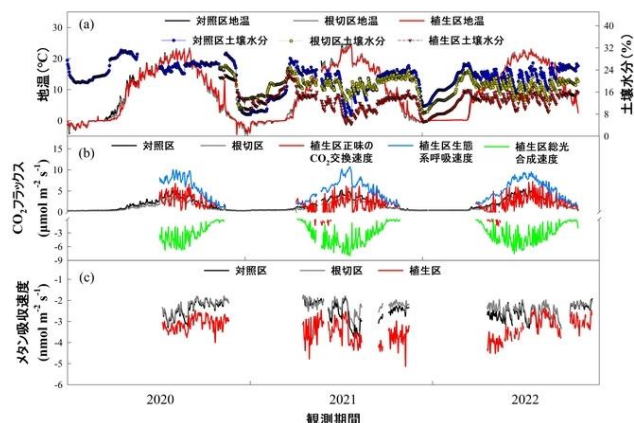


図-1.21. 苦小牧カラマツ林における (a) 地温と土壌水分、(b) 土壌CO₂フラックスおよび (c) メタン吸収速度の季節変動

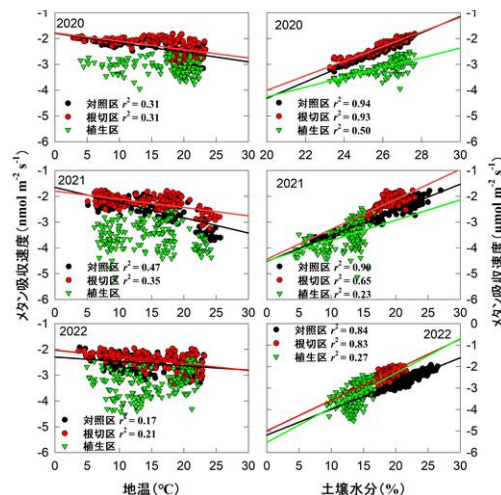


図-1.22. 苦小牧カラマツ林における年別のメタン吸収速度と地温(左)および土壌水分(右)との関係

び生態系呼吸（林床植生区）で、それぞれ 8.7 ± 0.7 、 6.2 ± 0.5 、 $12.4 \pm 1.1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ となり、微生物呼吸が土壌呼吸の 71% を占めた。また、下層植生の光合成による CO_2 吸収量 ($-5.2 \pm 2.3 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) を考慮しても、下層生態系が正味の CO_2 放出源 ($9.0 \pm 1.2 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) であることがわかった。なお、土壌呼吸、微生物呼吸および生態系呼吸の温度反応 (Q_{10}) は、それぞれ 3.08 ± 0.16 、 2.77 ± 0.20 、 2.69 ± 0.21 であり、土壌呼吸の Q_{10} は微生物呼吸の値よりも有意に高かった ($P < 0.001$)。一方、2020 年を除いて、 CO_2 フラックスに対する土壌水分の影響は有意ではなかった。間伐影響 (2014 年から 2015 年実施) に関する長期的な CO_2 フラックスの変動に注目すると、林床植生を含む林床部の CO_2 排出は間伐後増加した一方で、総一次生産は間伐後 3~4 年程度増加するものの、その増加傾向はその後徐々に元のレベル近くまで低減したため、林床部全体では間伐後 CO_2 の排出が徐々に増大していく傾向が見られた。

本サイトの土壌がメタン吸収源であることが確認された。土壌 CH_4 フラックスは、土壌水分が低下する夏季に上昇する傾向を示した (図-1.23c)。地温および土壌水分と CH_4 フラックスの関係では、対照区、根切区、林床植生区ともに、地温とは負の直線関係、土壌水分とは正の直線関係 (図-1.24) が認められた。地温との関係は、地温と土壌水分の間の負の相関関係に起因している可能性がある。 CH_4 フラックスの観測期間の年平均値は、対照区、根切区および林床植生区で、それぞれ -3.08 ± 0.16 、 -2.77 ± 0.20 、 $-2.69 \pm 0.12 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ となり、有意な処理区間差 (分散分析、 $P < 0.01$) が認められ、対照区のメタン吸収量が根切区と植生区よりも大きいことがわかった。この処理区間差については、土壌の理化学性や土壌水分の処理区間差などを用いてさらに解析する必要がある。

(2-4) 中国亜熱帯亜高山帯天然針葉樹林 (麗江)

本サイトでは、2020 年から 2022 年における 3 年間の観測データが得られている。2022 年度まで土壌 CO_2 フラックスの通年連続観測を行ってきた。分析計が不調となり、2022 年 1 月から 2022 年 8 月まで CO_2 フラックスの観測が停止した。観測期間における地温と土壌水分と土壌 CO_2 フラックスに関する季節変動を図-1.25 に示す。土壌呼吸と微生物呼吸の年平均値は $1.44 \sim 1.54$ 、 $1.31 \sim 1.41 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、年積算値はそれぞれ、 $5.4 \sim 6.3$ 、 $5.0 \sim 5.4 \text{ tC ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であった。土壌呼吸に占める微生物呼吸の割合が 88% であった。 CO_2 フラックスは地温に強く依存しており、毎年指数関数的相関が得られた。一方で、基本的には CO_2 フラックスと土壌水分との相関は見られなかったが、2021 年は例外的に降水量が少なかったため、土壌水分と CO_2

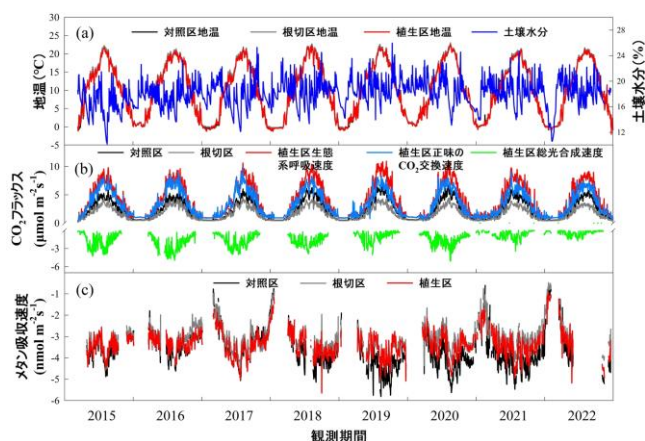


図-1.23. 富士北麓カラマツ成熟林における (a) 地温と土壌水分、(b) CO_2 フラックス、(c) メタン吸収速度の季節変動

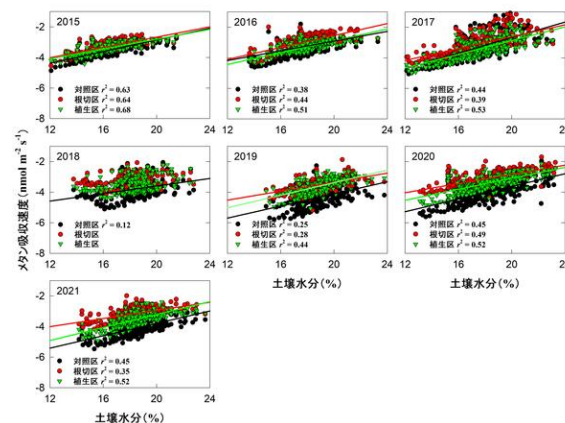


図-1.24. 富士北麓カラマツ成熟林における年別のメタン吸収速度と土壌水分の関係

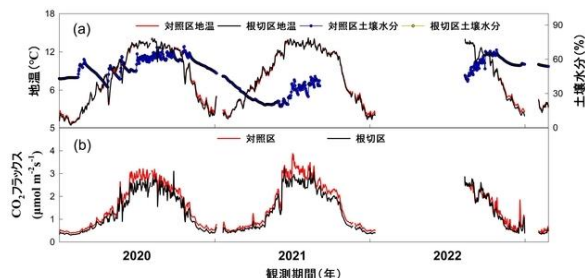


図-1.25. 中国亜熱帯亜高山帯天然針葉樹林における (a) 地温と土壌水分、(b) 土壌 CO_2 フラックスに関する季節変動

フラックスの間に有意な関係性が見られた（図-1.26）。土壌呼吸と微生物呼吸の Q_{10} と R_{10} の3年間の平均値はそれぞれ 4.07 ± 1.19 、 4.48 ± 0.86 と 1.72 ± 0.41 、 $1.49 \pm 0.09 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。本サイトは高標高で低温であるため、 CO_2 フラックスが他のサイトと比して非常に小さかった。

(2-5) 台湾亜熱帯スギ林（台湾スギ）

本サイトでは、2020年1月から2021年3月まで土壌 CO_2 フラックスの通年連続観測を行ってきた。分析計が不調となり、2021年3月から CO_2 の観測が停止した。観測期間における地温、土壌水分と土壌 CO_2 フラックスに関する季節変動を図-1.27に示す。2020年土壌呼吸と微生物呼吸の年平均値は 3.11 と $2.43 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、年積算値はそれぞれ、 11.8 と $9.2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であった。微生物呼吸と根呼吸はそれぞれ土壌呼吸の78%と22%を占めており、微生物呼吸の土壌呼吸への寄与率が高かった。 CO_2 フラックスが地温に強く依存しており、指数関数的相関が見られた。本サイトは降水量が多いこともあり、土壌水分との関係は見られなかった（図-1.28）。2020年における土壌呼吸と微生物呼吸の Q_{10} と R_{10} はそれぞれ 3.20 、 1.45 と 2.37 、 $1.38 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。

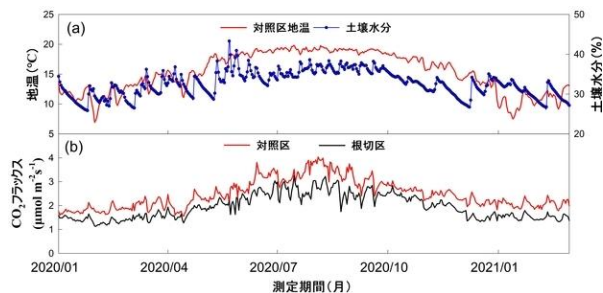


図-1.27. 台湾亜熱帯林における (a) 地温と土壌水分、(b) 土壌 CO_2 フラックスに関する季節変動

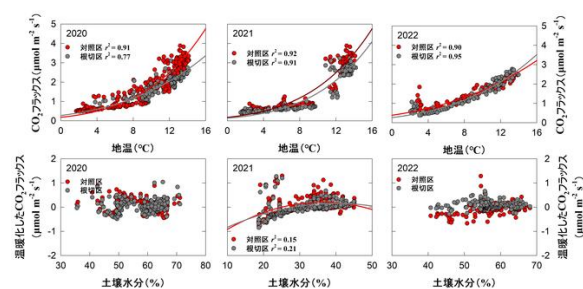


図-1.26. 中国亜熱帯亜高山帯天然針葉樹林における年別の土壌 CO_2 フラックスと地温（上）および土壌水分（下）との関係

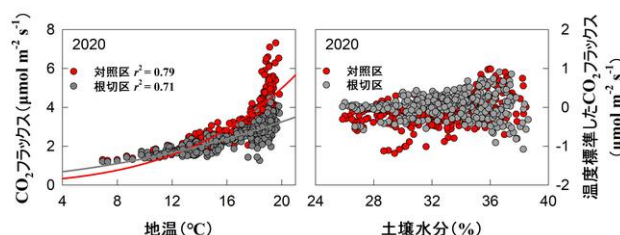


図-1.28. 台湾亜熱帯林における年別の土壌 CO_2 フラックスと地温（左）および土壌水分（右）との関係

(2-6) マレーシア低地熱帯天然林（パソ）

本サイトでは、 CO_2 分析計に関しては2-1705課題で設置したものを継続的に利用していたが、メタン分析計に関しては2015年12月に設置し、以降2022年度まで土壌 CO_2 フラックスと CH_4 フラックスの通年連続観測を継続した。メタン分析計が不調となり、欠測が多発した。2015年から2022年における地温と土壌水分、土壌 CO_2 フラックスと CH_4 フラックスに関する季節変動を図-1.29に示す。年間を通して地温の変化が小さく、 $24 \sim 27^\circ\text{C}$ の範囲で変動していた。このサイトでは、例年10月～翌年1月頃まで雨季であり、土壌水分が上昇する傾向が見られた。観測期間における土壌呼吸と微生物呼吸の年平均値は $7.50 \sim 10.57$ 、 $2.78 \sim 8.67 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、年積算値はそれぞれ、 $28.4 \sim 40.0$ と $21.9 \sim 32.8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であった。本サイトでは地温と土壌水分はいずれも CO_2 フラックスに対する影響が明瞭ではない。また、他の観測サイトと比べて CO_2 フラックスが非常に大きかった。原因は地下部のバイオマスが大きく、微生物による分解も多いためと考えられた。

一方で、観測期間中にメタンが吸収されたり放出したりすることが観測された（図-1.29）。対照区と

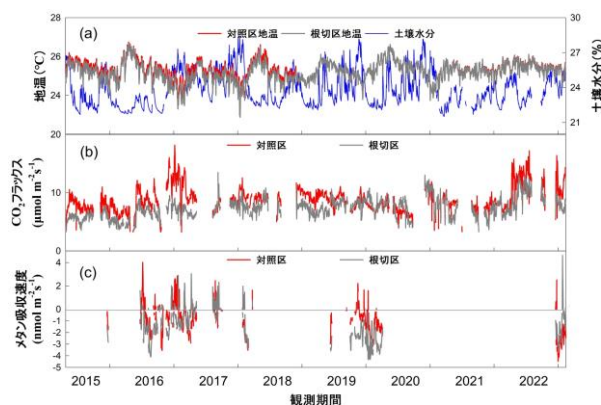


図-1.29. マレーシア低地熱帯天然林における (a) 地温と土壌水分、(b) 土壌 CO_2 フラックス及び(c) メタン吸収速度に関する季節変動

根切区のCH₄フラックスの年平均値は-2.10~-0.34と-2.97~-0.30 nmol m⁻² s⁻¹であり、2つの処理区間でCH₄フラックスの大きな違いはなかった。また、2015年から2022年におけるメタン吸収に関する年積算値はそれぞれ-1.3~-7.9と-1.1~-11.2 kg CH₄ ha⁻¹ yr⁻¹であった。観測期間全体でみれば、メタンは吸収されていた。両処理区ともCH₄フラックスと地温の間に相関は見られなかったが（2021年を除く）、CH₄フラックスと土壌水分の間にはある程度の相関が見られた（図-1.30）。本サイトにおけるメタンの放出に関しては、シロアリの影響が考えられるが、それに関する定量化と予測などが今後の課題になると考えられる。

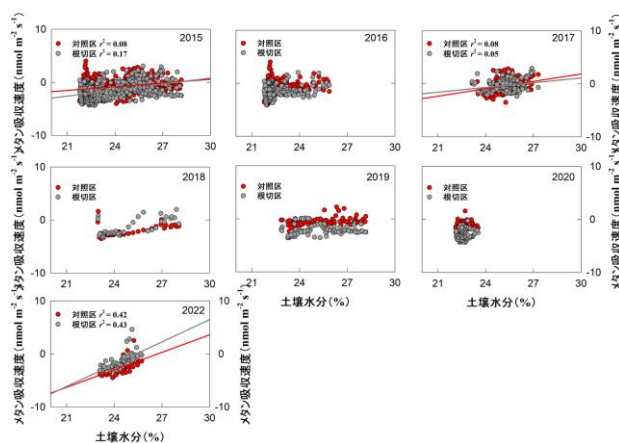


図-1.30. マレーシア低地熱帯天然林における年別の土壌メタン吸収速度と土壌水分の関係

5. 研究目標の達成状況

観測（サブテーマ1とサブテーマ2の一部）に関しては、コロナ禍にもかかわらず、先行研究で築き上げた現地共同研究者との協力体制によって、海外観測サイトを含め、観測やサンプリングなどを計画通り実施することができた。特に、メタン観測に関しては、当初の計画より連続観測サイトの数を3ヶ所（国内2ヶ所、マレーシア1ヶ所）も多く実施したことに加え、観測キャンペーンを国内40数ヶ所で面的展開した。メタンの連続観測に関して：当初の計画よりさらに3サイト（国内の天塩フラックスと苫小牧カラマツ林台風跡地、マレーシアのオイルパームプランテーション）を展開した。国内におけるメタン観測の面的展開に関して：初年度における8サイトの連続観測に基づくCH₄フラックスは、既往のデータセット（53ヶ所での手動ガスサンプリング）の約2倍に相当した。本結果を検証するため、可搬型CO₂/CH₄フラックス測定システムを開発し、サブテーマ2の協力のもと、国内における41ヶ所の森林で観測キャンペーンを実施した。サブテーマ2（モデル）への貢献に関して：当初の計画より、豊富なデータセットを提供した。

6. 参考文献

特に記載すべき事項はない。

Ⅱ－２ 長期的観測データに基づいたアジア森林土壌におけるCH₄/CO₂フラックスの広域推定と将来予測

２．研究目標

Ⅱ－２ 長期的観測データに基づいたアジア森林土壌における CH₄/CO₂ フラックスの広域推定と将来予測

国立大学法人 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター

市井 和仁

国立研究開発法人 国際農林水産業研究センター

近藤 俊明

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター

小嵐 淳・安藤 麻里子

〔要旨〕

森林土壌はCO₂の28倍の温室効果を持つメタンの吸収源として機能する一方、微生物による土壌有機物の分解を介して膨大な量のCO₂排出にも寄与するなど、気候変動に対して相反する異なる2つの性質を有している。本サブテーマでは、こうした森林土壌を介したメタンガスの吸収やCO₂排出、すなわち土壌CH₄/CO₂フラックスの広域推定や将来予測を高精度で実現するため、その空間変動を規定する土壌物理・化学・生物特性の解明や温暖化に対する応答の評価を行うとともに、様々な地域に対して適用可能な推定・予測モデルの構築を行った。その結果、(1) 森林土壌を介したメタンガスの吸収については、メタンの分解・生成に寄与するメタン資化細菌・メタン生成古細菌量や、表層土壌のバルク密度および非晶質鉱物含有量によって規定され、温暖化に伴う土壌の乾燥化に起因したメタン資化細菌量の増加とメタン生成古細菌量の減少によって土壌が有するメタン吸収能が向上すること、また、(2) 土壌からのCO₂排出については、土壌有機炭素の蓄積量やその代謝回転速度によって規定され、土壌有機物蓄積量が多いモンスーンアジアの森林では、温暖化に伴うCO₂排出の増加が長期間に渡って維持されることなどが明らかとなった。また、こうした結果を踏まえ、衛星観測データや機械学習を活用し、モンスーンアジア域における森林土壌CH₄/CO₂フラックスの広域推定（マップ化）を行った。

１．研究開発目的

サブテーマ1「長期的な温暖化操作実験及びCH₄/CO₂フラックスの同時連続観測による土壌炭素動態に対する気候変動影響の定量化」における土壌CH₄/CO₂フラックス観測および温暖化操作実験の結果から、(1) 土壌CH₄/CO₂フラックスは地域や植生、気象条件等に応じて大きく変動すること、また、(2) 土壌有機物の蓄積が豊富なアジアの森林土壌においては、温暖化による微生物呼吸量の促進効果が長期間持続されることや、(3) 温暖化に伴う土壌の乾燥化により土壌CH₄フラックスが増加すること等が明らかとなっている。

そこで本サブテーマでは、(1) 微生物呼吸中の放射性炭素同位体比（ $\Delta^{14}\text{C}$ ）、およびメタン資化細菌やメタン生成古細菌に代表される土壌CH₄フラックスに強く寄与する土壌微生物叢の分析を通じて、土壌炭素フラックスの温暖化応答メカニズムの解明を行うとともに、(2) 土壌CH₄/CO₂フラックスを規定する土壌物理・化学・生物特性の解明と推定・予測モデルの構築を行うことを目的とする。また、得られた成果を考慮したうえで、(3) モンスーンアジア域における森林土壌CH₄/CO₂フラックスの広域推定（マップ化）を行う。

２．研究目標

本サブテーマでは、サブテーマ1が構築したプラットフォーム及びデータセットを活用し、土壌

CH₄/CO₂フラックスの気候変動に対する長期的な応答メカニズムの解明と、それに基づく広域推定および将来予測を行うことを目標とする。具体的には、土壌微生物特性と土壌呼吸に由来する¹⁴Cの分析により、アジア域の森林における土壌呼吸量や土壌呼吸に対する温暖化影響と、微生物特性（バイオマス・種組成）および有機炭素分解特性（分解された有機炭素の年代等）との関係性を明らかにする。特に、温暖化処理前後の微生物と土壌呼吸に由来する¹⁴Cの変化量から、温暖化によってアジアモンスーン域の有機炭素分解が増進し、その増進効果が長期的に維持されるメカニズムの解明が可能となる。さらに、土壌CH₄フラックスに関わるメタン分解菌・生成菌の分析によって、CH₄フラックスと土壌構造（孔隙率や有機炭素含有量）や環境因子（特に土壌水分）、生物因子（優占樹種）などとの関係性が解明できる。これらの知見を基に、サブテーマ1の観測ネットワークにおける土壌CH₄/CO₂フラックスを説明する関係式を構築する。開発された関係式やその他衛星観測データなどに基づき、アジア域における森林土壌CH₄/CO₂フラックスの広域推定および将来予測を行う。

加えて、海外の12ヶ所（計4カ国（地区））における研究体制の維持にあたっては、現地研究者のキャパシティ・ビルディングを行い、日本のアジア地域におけるイニシアティブを発揮し、将来的なデータ集積の効率化に貢献する

3. 研究開発内容

(3-1) 土壌炭素フラックスの温暖化応答メカニズムの解明

先述の通り、サブテーマ1「長期的な温暖化操作実験及びCH₄/CO₂フラックスの同時連続観測による土壌炭素動態に対する気候変動影響の定量化」における温暖化操作実験の結果から、土壌有機物の蓄積が豊富なアジアの森林土壌においては、温暖化による微生物呼吸の緩速化が生じず、温暖化に伴い微生物呼吸量が増加すること、すなわち温暖化による微生物呼吸量の促進効果が長期間持続されることや、温暖化に伴う土壌の乾燥化により土壌のCH₄フラックスが増加することなど、アジアの森林土壌が将来生じうる温暖化に対して膨大なCO₂放出源となる一方、CO₂の約28倍の温室効果を持つメタンの吸収源となることが明らかとなっている。

本課題では、微生物呼吸中の放射性炭素同位体比（ $\Delta^{14}\text{C}$ ）、およびメタン資化細菌やメタン生成古細菌に代表される土壌CH₄フラックスに強く寄与する土壌微生物叢の分析を通じて、土壌炭素フラックスの温暖化応答メカニズムの解明を行った。以下に、課題3.1.1「放射性炭素（¹⁴C）分析による微生物呼吸の長期的な温暖化応答メカニズムの解明」および課題3.1.2「土壌微生物評価による土壌CH₄フラックスの温暖化応答メカニズムの解明」の研究開発内容を記す。

(3-1-1) 放射性炭素（¹⁴C）分析による微生物呼吸の長期的な温暖化応答メカニズムの解明

サブテーマ1で実施している温暖化操作実験において、アジアモンスーン域の森林では、温暖化による微生物呼吸の促進効果が長期間持続することが観測されており、特に最北端針広混交林サイトでは大きな温暖化効果が示された。一方で、先行の推進費課題「アジアの森林土壌有機炭素放出の温暖化影響とフィードバック効果に関する包括的研究」では、6～12年にわたる温暖化操作により有機物分解が促進された後も土壌有機炭素特性が変化していないことが明らかとなった。本課題では、温暖化による微生物呼吸の応答メカニズムを直接的に調べるために、微生物呼吸中の放射性炭素同位体比（ $\Delta^{14}\text{C}$ ）を分析し、微生物呼吸に寄与する有機物の起源や年代のサイト間の違いと温暖化による変化を明らかにした。

本プロジェクトが構築しているチャンバー観測ネットワークのうち、長期にわたり温暖化操作実験を実施している国内5サイト（天塩温暖化、白神山地、つくば、広島、宮崎）の根切区と温暖化区において、チャンバー（縦90×横90×高さ50 cm）の蓋を閉じて1時間から2時間程度経過した後の内部の空気と、周囲の大気を採取した。チャンバー内空気及び大気からCO₂を精製・回収し、炭素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）及び $\Delta^{14}\text{C}$ を安定同位体比質量分析装置（IsoPrime100, Isoprime Ltd., UK）及び加速器質量分析装置（JAEA-AMS-TONO-5MV）を用いてそれぞれ分析した。微生物呼吸の $\Delta^{14}\text{C}$ （ $\Delta^{14}\text{C}_{\text{res}}$ ）は、チャンバー内空気と大気

の炭素濃度及び $\Delta^{14}\text{C}$ を用いて、次の式により算出した(Atarashi-Andoh et al., 2012)。

$$\Delta^{14}\text{C}_{\text{res}} = (\Delta^{14}\text{C}_f \cdot C_f - \Delta^{14}\text{C}_0 \cdot C_0) / (C_f - C_0) \quad (2)$$

ここで、 $\Delta^{14}\text{C}_f$ と C_f はチャンバー内空气中 CO_2 の $\Delta^{14}\text{C}$ (‰)及び濃度 (ppm)、 $\Delta^{14}\text{C}_0$ と C_0 は大気中 CO_2 の $\Delta^{14}\text{C}$ (‰)及び濃度 (ppm)である。微生物呼吸の $\delta^{13}\text{C}$ についても同様に、チャンバー内空気と大気の炭素濃度及び $\delta^{13}\text{C}$ を用いて算出した。 $\Delta^{14}\text{C}$ 値は、1950年(核実験前)の大気中 CO_2 の $\Delta^{14}\text{C}$ 値を基準(0‰)として、差を千分率で表す指標である。大気中 CO_2 の $\Delta^{14}\text{C}$ 値は核実験により1963年に約900‰まで増加したのち減少し、現在では0‰前後である。したがって、 $\Delta^{14}\text{C}_{\text{res}}$ が正の値であれば、核実験起源 ^{14}C が存在することを示し、数年から数十年前に供給された有機炭素が分解されたと判断できる。一方で、 $\Delta^{14}\text{C}_{\text{res}}$ が負の値であれば、土壌に長く留まることで ^{14}C の放射性壊変(半減期5730年)が進んだ古い有機炭素が分解されたことを示唆する(Koarashi et al., 2009)。

(3-1-2) 土壌微生物評価による土壌 CH_4 フラックスの温暖化応答メカニズムの解明

土壌中には、有機物を分解して大気中に CO_2 を放出する土壌微生物や、 CO_2 を基質として CO_2 の28倍の温室効果を持つメタンを合成するメタン生成古細菌、メタンを炭素源・エネルギー源としてメタンの分解に寄与するメタン資化細菌など、気候変動をもたらす温室効果ガスの生成・分解に係る多くの種が存在する。温暖化や土地利用転換に伴うこれら土壌微生物相の変化は地球規模の温室効果ガス収支にも多大な影響を及ぼすため、その評価は気候変動の将来予測において重要である。

これまでに、土壌微生物による有機物の分解に伴って放出される CO_2 、すなわち微生物呼吸に着目して温暖化応答メカニズムの解明を行った結果(環境研究総合推進費課題「アジアの森林土壌有機炭素放出の温暖化影響とフィードバック効果に関する包括的研究」)、アジアの森林においては、①温暖化による微生物呼吸の緩速化が生じず、温暖化に伴い総微生物呼吸量が増加すること、②温暖化環境下においても微生物呼吸量の減少をもたらすと考えられる土壌微生物量の減少は生じず、土壌微生物種の消失も限定的であること、③温暖化環境下においては、土壌微生物の運動や土壌有機物の分解に係る遺伝子発現量が増加すること、つまり、土壌微生物の活性が高まることで、結果的に微生物呼吸量が増加することなど、「気候変動に対する土壌微生物の応答」が明らかとなってきた。

そこで本課題では、 CO_2 の28倍の温室効果を持つメタンの土壌フラックスに着目し、メタンの分解・生成に強く寄与するメタン資化細菌およびメタン生成古細菌のアジア域の森林における分布特性および温暖化応答を評価した。具体的には、大型マルチ自動開閉チャンバーシステムを用いて土壌 CH_4/CO_2 フラックスが観測されてきた国内外の観測サイトのうち、長期に渡って温暖化操作実験が行われている国内5サイト(天塩温暖化サイト、白神山地、つくば、広島、宮崎)および温暖化操作実験は行われていないものの、土壌 CH_4/CO_2 フラックス観測が行われている国内3サイト(天塩フラックス、苫小牧、富士北麓)の計8サイトにおいて、チャンバー内から土壌を採集し、定量PCR法およびメタゲノム解析を用いて土壌 CH_4 フラックスに強く関わるメタン資化細菌およびメタン生成古細菌の量と種組成を把握した。

まず、全8サイトを対象にメタン資化細菌とメタン生成菌の種組成を把握するとともに、最大で深さ40cmまでの土壌における垂直分布構造を評価した。また、温暖化操作実験が行われている国内5サイトについては、温暖化区と根切区におけるメタン資化細菌およびメタン生成菌量の比較から、メタン資化細菌およびメタン生成菌動態に対する温暖化の影響を明らかにした。最終的に、得られた結果をもとに、温暖化に対してメタン資化細菌およびメタン生成菌量がどのような応答を示し、結果として土壌 CH_4 フラックスがどう変動するのかといった、一連の温暖化応答の解明を行った。

(3-2) 土壌微生物呼吸の推定・予測モデルの構築および土壌 CH_4 フラックスの空間変動を規定する土壌環境要因の解明

先述の通り、サブテーマ1「長期的な温暖化操作実験及び CH_4/CO_2 フラックスの同時連続観測による土壌炭素動態に対する気候変動影響の定量化」における土壌炭素フラックス観測から、アジアの森林に

おける微生物呼吸量や土壌が有するメタン吸収能、およびそれらの温暖化応答は地域や植生によって大きく異なることが明らかとなっている。

本課題では、土壌炭素フラックスの広域評価に向け、森林土壌の物理・生物特性と土壌炭素フラックスとの関係を明らかにすることで、土壌炭素フラックスの空間変動を規定する土壌環境要因の解明を試みた。以下に、課題3.2.1「土壌微生物呼吸の推定・予測モデルの構築」および課題3.2.2「土壌CH₄フラックスの空間変動を規定する土壌環境要因の解明」の研究開発内容を記す。

(3-2-1) 土壌微生物呼吸の推定・予測モデルの構築

アジアの森林における土壌微生物呼吸の広域推定及び将来予測を高精度で実現するためには、様々な地域に対して適用可能な土壌微生物呼吸推定・予測モデルの構築が不可欠である。これまで、個別のサイトにおける観測結果に基づいたモデルの開発は行われてきているが、開発されたモデルの他地域への適用は一般に困難であり、そのことが微生物呼吸をはじめとした土壌CO₂フラックスの広域推定や将来予測の高精度化を妨げる大きな要因となっていた。そこで本研究では、日本を中心にアジア域に広く展開したチャンバー観測ネットワークを活用して、ネットワークサイトをまたいで土壌微生物呼吸を推定・予測できる普遍的なモデルの構築を試みた。

チャンバー観測ネットワークサイトのうち、温暖化操作実験を実施している国内5サイト（天塩温暖化、白神山地、つくば、広島、宮崎）及び国外1サイト（中国の哀牢山）、ならびに温暖化操作実験を実施していない国内1サイト（富士北麓）の計7サイトを詳細調査の対象サイトとした。土壌試料は、先行の推進費課題（2-1705）において採取した試料（各サイトにおいて任意に選定した3基のチャンバーから、リター層、土壌層0-5、5-10、10-20 cmを採取）を活用した。

リター及び土壌試料の炭素含有量（gC kg⁻¹-dry soil）及び窒素含有量（gN kg⁻¹-dry soil）を元素分析計（vario PYRO cube, Elementar, Germany）を用いて測定した。また、これらの試料に含まれる有機物の炭素安定同位体比（δ¹³C）及び窒素安定同位体比（δ¹⁵N）を安定同位体比質量分析装置（IsoPrime100, Isoprime Ltd., UK）を用いて測定した。さらに、土壌有機炭素の¹⁴C同位体比（Δ¹⁴C）を、日本原子力研究開発機構の加速器質量分析装置（JAEA-AMS-TONO-5MV、またはJAEA-AMS-MUTSU）を用いて測定した（Koarashi et al., 2009）。

さらに、温暖化操作実験を実施している国内5サイト（天塩温暖化、白神山地、つくば、広島、宮崎サイト）において、土壌有機炭素の微生物分解の温度反応特性を評価するために、チャンバー外の土壌断面より土壌試料を深さごと（0-5 cm、5-10 cm、10-20 cm）に採取した。土壌試料を湿潤状態のまま4 mmのふるいを通し、細根を除去した後、土壌の水分量を最大容水量の60%に調整した。この土壌を2種類の異なる温度条件（20℃及び30℃）で培養し、CO₂濃度の増加に基づいて分解放出された土壌炭素量を算出した。培養温度20℃及び30℃のそれぞれにおいて、全土壌炭素の1%がCO₂として分解放出されるまでの時間（t₂₀及びt₃₀）を求め、その比から、以下の式により土壌有機炭素の微生物分解の温度依存性パラメーター（Q₁₀）を算出した（Conant et al., 2008）。

$$Q_{10} = t_{20} / t_{30} \quad (3)$$

(3-2-2) 土壌CH₄フラックスの空間変動を規定する土壌環境要因の解明

森林土壌における土壌CH₄フラックスを正確に評価することは、地球温暖化の将来を予測する上で重要な課題である。しかし、森林土壌が有するメタン吸収能の時空間的変動要因については未解明な点が多い。サブテーマ1の長期連続観測結果から、日本の森林土壌における土壌CH₄フラックスは世界の平均の2～3倍に相当し、黒ボク土における吸収速度が他の土壌タイプと比較して大きい傾向があることが明らかになってきている。そこで本研究では、国内外のチャンバー観測ネットワークサイトを対象に、黒ボク土において特徴的な土壌環境・鉱物特性やメタン資化細菌・メタン生成古細菌等の土壌生物特性に着目して、それらの特性とメタン吸収量との関連性を探究した。

土壌環境・鉱物特性との関係評価においては、チャンパー内から採取した土壌層（0-5 cm、5-10 cm、10-20 cm）に対して、乾燥した土壌試料の重量とコア容積に基づいて、土壌のバルク密度（ g cm^{-3} ）を算出した。礫含有率(%)は、2 mmより大きいフラクションの全体に占める重量の割合により算出した。土壌中のピロリン酸可溶及び酸性シュウ酸可溶のアルミニウム（Al）と鉄（Fe）の含有量を誘導結合プラズマ発光分光分析装置（ICP-OES 5110, Agilent, USA）を用いて分析し、ピロリン酸塩可溶Al含有量に基づいてAl-腐植複合体の存在量を、酸性シュウ酸可溶Al及びFeの含有量に基づいて非晶質鉱物の存在量を把握するとともに、黒ボク特徴の指標として用いられる $\text{Al}_{\text{lo}} + 0.5\text{Fe}_{\text{lo}}$ 値（酸性シュウ酸可溶Al量にシュウ酸可溶Fe量の1/2を加えた値, $\text{g kg}^{-1}\text{-dry soil}$ ）を算出した(Imaya et al., 2007)。

また、土壌生物特性と土壌 CH_4 フラックスとの関係評価では、定量PCRを用いて採取土壌中の細菌量を測定するとともに、メタゲノム解析を用いて土壌 CH_4 フラックスに強く寄与するメタン資化細菌およびメタン生成古細菌の出現頻度を明らかにすることで、単位重量当たりのメタン資化細菌・メタン生成古細菌量を算出し、土壌メタン吸収量との関係性を評価した。その際、土壌メタン吸収量については年平均、および土壌採取日を起点とした6ヶ月、3ヶ月、1ヶ月、2週間の平均値を用いた。

(3-3) 土壌炭素フラックスの広域推定

サブテーマ1で測定された各地の土壌炭素(CO_2 , CH_4)フラックスを活用した日本域・モンスーンアジア域の広域推定を行うことを目的とした。サブテーマ1では、土壌からの CO_2 , CH_4 のフラックスを測定しており、サブテーマ2では、これら測定値と気象パラメーター、衛星リモートセンシング観測パラメーターなどの値を用いて、主には機械学習法を用いた広域推定を試みた。3.3.1章に CO_2 に関して、3.3.2.章では CH_4 に関しての手法を記載する。

(3-3-1) 土壌 CO_2 フラックスの広域推定

サブテーマ1における観測ネットワークのうち8サイトのチャンパー観測データを活用して広域推定を行った。8サイトは、天塩・苫小牧・白神・苗場・筑波・富士北麓・広島・宮崎である。また、説明変数として、気象・水文パラメーター（気温・降水量・地温・土壌水分量；現地観測値）、衛星観測パラメーター（地表面温度・葉面積指数・正規化植生指数・正規化水指数）、光合成量（AsiaFluxサイトを用いた機械学習による推定値; Ichii et al. 2017）、土壌有機炭素量（FAO推定値）を用いた。衛星観測パラメーターについては、Terra, Aqua衛星搭載のMODISセンサからのプロダクトを利用した。時間変化するパラメーターとして、気象・水文パラメーター、衛星観測パラメーター、光合成量があるが、衛星観測パラメーターの頻度に合わせて、いずれも8日単位で平均し、8日単位の推定を行った。

広域推定のモデルとして、機械学習の一つとして広く用いられているランダムフォレスト回帰を利用した。ランダムフォレスト回帰は、決定木を基盤とした機械学習アルゴリズムであり、実行速度が速く、未知数が多くはないという利点を持つ。また、モデルの構築にあたっては、ランダムフォレスト回帰の構造の大枠を決めるハイパーパラメーターをグリッドサーチ法で決定した。本研究では、3つのハイパーパラメーターをグリッドサーチ法で決定した。

モデルの構築にあたっては、広域推定を目的とするために、8サイトのうち7サイトを用いてトレーニングを行い、残りの1サイトを予測（テスト）し、それを8サイト分行うことでモデルの評価を行った。入力パラメーターとしては、上記のすべてを利用したもの、一部を利用したものなど、様々なケースを試行し最も良好な結果（観測とモデル予測のRMSE値が最小になるもの）を得たモデルを最終モデルとした。構築したモデルを用いて日本列島の土壌呼吸量を推定し2006-2018年における時系列変化を確認した。さらには、既存の推定値との比較を行い、本研究の推定値の位置づけを確認した。

最後に推定したモデルを用いてモンスーンアジア域の土壌呼吸量を1kmの空間解像度で推定した。この推定に当たっては、一部の入力データを高い空間解像度で得ることが困難なため、衛星観測データのみを説明変数としてモデルを構築し広域推定を行った。また、将来予測実験として、モデルの入力パラ

メーターである地表面温度を2℃上昇させたモデルランを行い、温暖化環境下における土壌CO₂フラックスの変化を評価した。

(3-3-2) 土壌CH₄フラックスの広域推定

まずは土壌CO₂フラックスと同様のアプローチをとり、ランダムフォレスト回帰と現地観測パラメーター(ここでは単純化のため気温・地温・土壌水分量)を用いて、観測された土壌CH₄吸収量の推定を行った。今回の解析では上記の観測値が現地観測で得られた7サイト(天塩・苫小牧・白神・つくば・富士北麓・広島・宮崎)を利用した。モデルの再現性について、CO₂フラックスとの比較を行い、モデルを改善するための方策を検討した。

次に、土壌におけるCH₄吸収量の推定には、土壌呼吸(CO₂)に比較して、より現地の情報・土壌の情報が必要であると判断し、まずは、サブ課題2で測定された土壌中の化学成分のデータを用いて、広域推定のためのモデル構築を試行した。土壌におけるCH₄吸収量の推定においては、土壌が好氣的であるか嫌氣的であるかが一つの重要要素であるとし、土壌の空隙率の指標となる土壌中のアルミ・鉄量を入力変数としたモデル構築を試みた。

最後に土壌CH₄フラックスの広域推定として、高空間解像度で推定が可能な衛星観測データ(Terra, Aqua衛星搭載のMODISセンサデータ)を利用した広域推定を行った。土壌CO₂フラックスと同様に1kmの空間分解能でアジアモンスーン地域を対象とした推定を行い、温度2度上昇させた仮想実験(温暖化実験)を行った。最後にこれらの結果と今後の改善方法についての考察を行った。

4. 結果及び考察

(4-1) 土壌炭素フラックスの温暖化応答メカニズムの解明

(4-1-1) 放射性炭素(¹⁴C)分析による微生物呼吸の長期的な温暖化応答メカニズムの解明

温暖化操作を実施している国内5サイトで採取した微生物呼吸中 $\Delta^{14}\text{C}$ 値とチャンバー内の土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値の深さ分布を図-2.1に示す。微生物呼吸中の $\Delta^{14}\text{C}$ 値は、天塩温暖化サイト以外の4サイトではリター層の値に近く、数年程度で代謝回転する有機炭素が微生物呼吸の主な起源となっていることが示された。また、温暖化区と根切区の間には有意な違いはなく、微生物呼吸の起源に明確な違いは見られなかった。このことから、長期間の温暖化操作実験を経ても、代謝回転の早い有機物が枯渇している様子はなく、今後も温暖化による微生物呼吸の促進効果が持続する可能性が明らかとなった。一方で、泥炭土壌で地下水位が高く土壌下層まで未分解の有機物が蓄

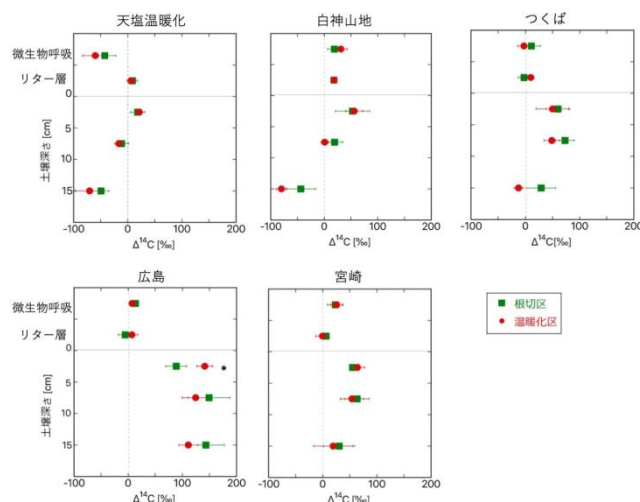


図-2.1 温暖化操作実験サイトの根切区と温暖化区における微生物呼吸と土壌有機物の $\Delta^{14}\text{C}$ 値分布

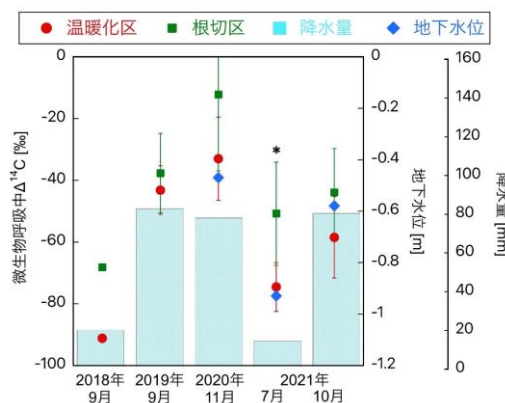


図-2.2 天塩温暖化サイトにおける微生物呼吸中 $\Delta^{14}\text{C}$ 値と地下水位及び降水量(採取前2週間)との関係

積している天塩温暖化サイトでは、微生物呼吸中の $\Delta^{14}\text{C}$ 値が負の値を示し、土壌深さ10-20 cmと同等かそれより深い層の古い有機物が分解・放出されていることが明らかになった。天塩温暖化サイトにおける、微生物呼吸の $\Delta^{14}\text{C}$ 値と採取時の地下水位及び直前の降水量との関係からは、地下水位が低下すると炭素年代で数百年を示す下層の炭素が放出される傾向がみられた（図-2.2）。また、根切区よりも土壌含水率が低い温暖化区で常により古い炭素が放出されていた。天塩温暖化サイトでは他のサイトに比べて3-15倍高い温暖化効果が15年にわたり継続している。先行課題の結果では、深さ20 cmまでの土壌有機物量・特性ともに温暖化による変化は認められず、温暖化により過剰に放出された炭素の起源が不明であった。本結果により、温暖化による土壌の乾燥が深い層のより古い有機物の分解を促進したことが明らかになった。

以上のことから、長期温暖化操作実験を実施している国内5サイトの森林土壌において、温暖化による微生物呼吸の促進効果（温暖化効果）の要因が土壌特性により異なることが明らかになった。地表から20 cm以深まで古い有機質に富んだ泥炭土壌では、下層土壌にまで温暖化の影響が及び、より古い炭素が消失していた。一方で、褐色森林土または黒ボク土である他の4サイトでは土壌有機物の炭素年代はサイトにより異なるものの微生物呼吸は全てのサイトで比較的若い炭素であることが示され、数年で代謝回転する炭素が10数年程度の温暖化では枯渇していないことが明らかになった。以上より、日本の土壌の豊富な有機物蓄積が、温暖化効果が長期にわたり持続する主要因になっていることが示された。

(4-1-2) 土壌微生物評価による土壌 CH_4 フラックスの温暖化応答メカニズムの解明

本課題では、温暖化操作のもと長期に渡って土壌 CH_4/CO_2 フラックスが観測されてきた国内5サイト（天塩温暖化、白神山地、つくば、広島、宮崎）および温暖化操作実験は行われていないものの、土壌 CH_4/CO_2 フラックス観測が行われている国内3サイト（天塩フラックス、苫小牧、富士北麓）のうち、遺伝解析を用いた土壌微生物叢評価に必要な量のDNAが得られなかったつくばサイトを除く7サイトにおいて、定量PCR法およびメタゲノム解析を用いて土壌 CH_4 フラックスに強く関わるメタン酸化細菌・メタン生成古細菌の量と種組成を把握した。また、温暖化サイトを対象とした温暖化区と根切区における土壌微生物叢の比較から土壌メタン吸収の温暖化応答メカニズムを解明した。

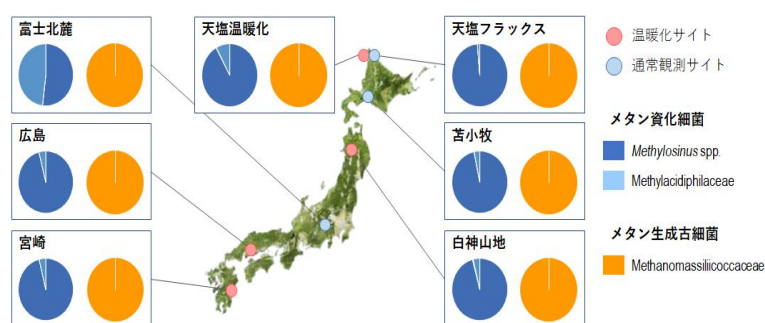


図-2.3. 各サイトにおけるメタン酸化細菌およびメタン生成古細菌の種出現率

まず、各サイトにおける土壌メタン吸収に係る土壌微生物特性については、全7サイトにおいて計1027種の細菌が確認され、そのうちの約1%に相当する10種がメタンの分解に寄与するメタン酸化細菌であった（図-2.3）。富士北麓を除く6サイトではMethylosinus属の3種のメタン酸化菌が優占したのに対し、富士北麓サイトでは酸性土壌を好むMethyloacidiphilaceae科の4種が優占した。また、メタン生成古細菌については全7サイトで4種が確認できたものの、すべてのサイトにおいて、植物細胞壁の加水分解等で生じるメタノールからメタンを合成するMethanomassiliicoccaceae科の1種が優占した（図-2.3）。

土壌深度（0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30, 30-40 cm）ごとにメタン酸化細菌およびメタン生成古細菌の出現頻度を評価した結果、生育に酸素が必要な好気性細菌であるメタン酸化細菌は、全7サイトを通じて地表面で高い出現頻度を示したのに対し、土壌深度が大きくなるに連れて減少する傾向がみられた（図-2.4a）。また、他のサイトと異なり、酸性土壌を好むMethyloacidiphilaceaeが優占した富士北麓では、メタン酸化細菌の出現頻度は他のサイトに比べて低い傾向にあった（図-2.4a）。一方、酸素がある環境下では生育できない偏性嫌気性細菌であるメタン古細菌の出現頻度は、全7サイトを通じて地表面で少なく、土壌深度が大きくなるに連れて増加する傾向がみられた（図-2.4b）。また、泥炭地植林であるた

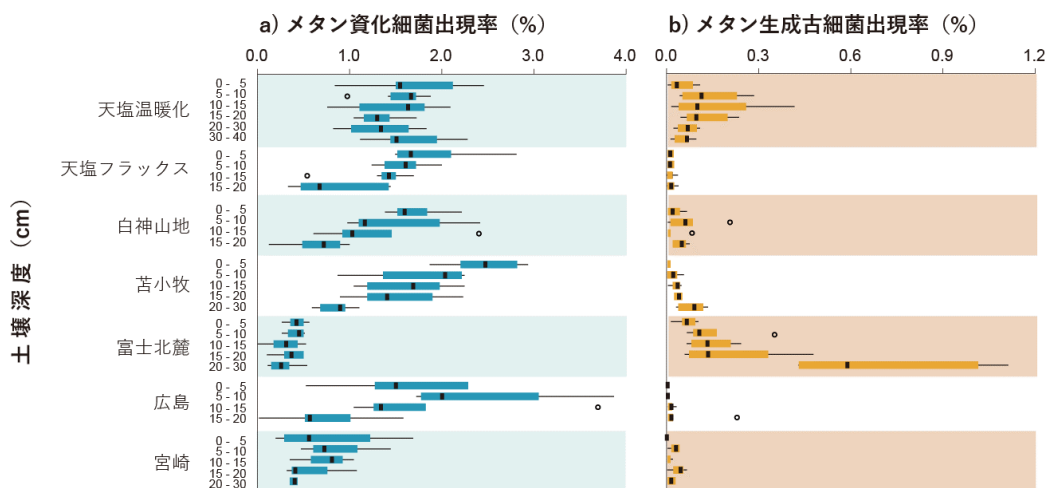


図-2.4. 各サイトにおける土壌深度ごとのメタン酸化細菌およびメタン生成古細菌の出現率

め地下水面が高く、他サイトに較べてメタン吸収量が小さい天塩温暖化サイトや、メタン酸化細菌が少なく、その種組成も他サイトとは異なる富士北麓では出現頻度が高い傾向にあった。

土壌CH₄フラックスの温暖化応答メカニズムの解明に向け、温暖化操作実験に伴いメタン吸収量が約1.83倍に大幅に増加した天塩温暖化サイトおよび約1.28に微増した白神山地サイトの2サイトを対象に、温暖化区と根切区における土壌深度ごとの土壌細菌量、メタン酸化細菌量およびメタン生成古細菌量の比較を行った（図-2.5および図-2.6）。

その結果、天塩温暖化サイトにおいては、5-10 cmを除く全ての土壌深度で温暖化区における土壌細菌量の増加がみられ（図-2.5a）、メタンの分解に係るメタン酸化細菌量についても全細菌量の増加に応じた増加が確認できた（図-2.5b）。一方、メタンの発生に係るメタン生成古細菌については、全ての土壌深度で温暖化区における減少が確認された（図-2.5c）。

こうしたメタン酸化細菌およびメタン生成古細菌の温暖化への応答は、温暖化に伴う土壌の乾燥化への応答に違いに起因するものと考えられた。先述の通り、好気性細菌であるメタン酸化細菌の生育には酸素が不可欠である一方、偏性嫌気性細菌であるメタン生成古細菌は酸素がある環境下では生育が不可能である。つまり、温暖化に伴う土壌の乾燥は、大気と土壌との間でのガス交換を促し、好気性細菌であるメタン酸化細菌の増加と偏性嫌気性細菌であるメタン生成古細菌の減少をもたらし、結果としてメタン吸収量の大幅な増加をもたらしたと考えられた。

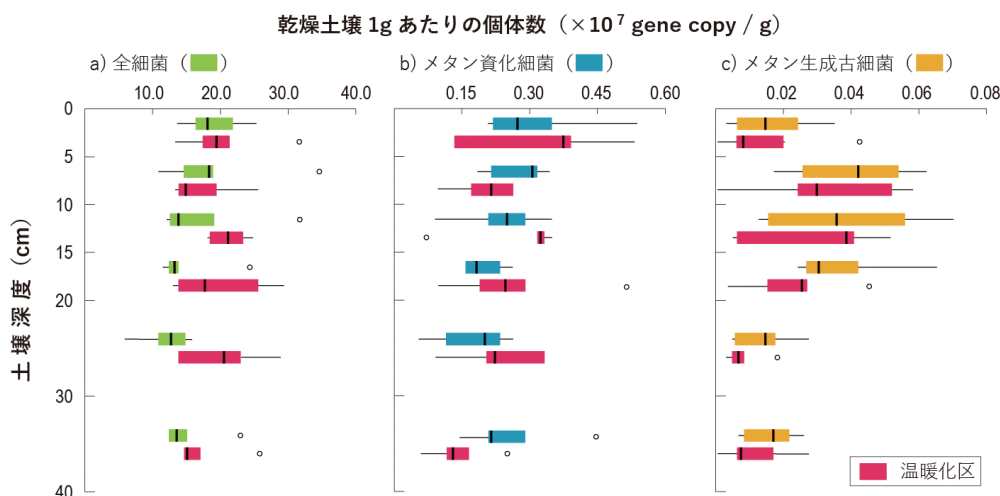


図-2.5 天塩温暖化サイトの温暖化区と根切区における土壌深度ごとの土壌細菌量、メタン酸化細菌量およびメタン生成古細菌量

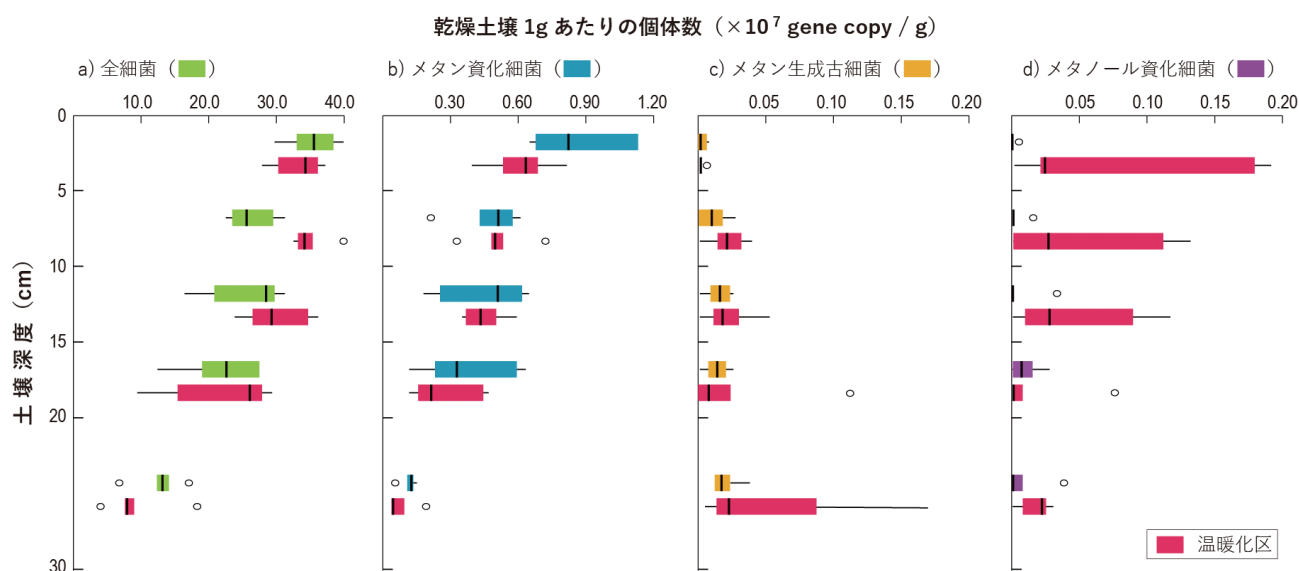


図-2.6. 白神山地サイトの温暖化区と根切区における土壌深度ごとの土壌細菌量、メタン産生古細菌量、メタン酸化細菌量およびメタノール産生古細菌量

一方、温暖化に伴うメタン吸収量の増加が小さい白神山地サイトでは、温暖化に対するメタン産生古細菌量およびメタン酸化細菌の応答はメタン吸収量の増加が大きい天塩温暖化サイトとは大きく異なるものであった（図-2.6a）。土壌細菌量については、20-30 cmを除く全ての土壌深度で温暖化区における増加（あるいは根切区と同等量）がみられたのに対し（図-2.6a）、メタン産生古細菌量については全ての土壌深度において減少が確認できた（図-2.6b）。一方、メタン酸化細菌については、全ての土壌深度で温暖化区における増加（あるいは根切区と同等量）が確認された（図-2.6c）。

こうした白神山地サイトにおける傾向は、リターおよび土壌有機物の分解に伴うメタノールの生成と、それに応じたメタノール産生古細菌の増加に起因するものと考えられた（図-2.6d）。サブテーマ1でも明らかになったように、温暖化によりリターおよび土壌有機物の分解が促進されるが、その際、微生物分解に伴ってメタノールが生成される。温暖化区でみられたメタノール産生古細菌およびメタノールからメタンを合成するメタン生成古細菌の増加はこうした影響を反映したもので、泥炭地植林である天塩温暖化サイトに比べ土壌水分量が少なく、高濃度でメタノールが存在する白神山地サイトで顕著になったと考えられる。また、メタノール産生古細菌は好気性細菌であり、メタン以外にメタノールを炭素源とする好気性細菌のメタン産生古細菌とは生育地や利用できる資源において競合関係にあるため、温暖化に伴うメタノール産生古細菌の増加はメタン産生古細菌の減少をもたらしたと考えられた。

つまり、温暖化に伴う土壌温度の増加はメタン産生古細菌の活性を高める効果があった一方、リターおよび土壌有機物の分解に伴うメタノールの増加に起因したメタン産生古細菌の減少とメタン生成古細菌の増加によって、温暖化に伴うメタン吸収量の増加は天塩温暖化サイトに比べて限定的になったと考えられた。以上から、温暖化に対するメタン産生古細菌・メタン生成古細菌の応答は地域によって異なり、土壌が持つメタン吸収機能にも影響すると考えられた。

(4.2) 土壌微生物呼吸の推定・予測モデルの構築および土壌CH₄フラックスの空間変動を規定する土壌環境要因の解明

(4.2.1) 土壌微生物呼吸の推定・予測モデルの構築

土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値は、1963年をピークとする大気圏核実験由来の ^{14}C の影響を受け、土壌における有機炭素の供給・分解放出の速度に応じて、大気中の $\Delta^{14}\text{C}$ 値の変化を累積的に反映して決定される（Koarashi et al., 2009）。本研究では、土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ が土壌有機炭素の代謝回転速度の指標となりうることに着眼し、土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値が微生物呼吸量の地域差や空間的変動を説明できる有力なパ

ラメーターとなりうると考えた。そこで、国内外の7サイトに対して、土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値と、サブテーマ1においてチャンバーを用いた連続観測によって評価された年積算微生物呼吸量（2017年）との関連性を解析した。その結果、土壌有機炭素量あたりの微生物呼吸量と土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値（リター層と土壌0-20 cmに対する値）の間に有意な正の相関関係（ $r=0.59$, $p<0.005$, 図-2.7左、宮崎サイトの外れ値を除くと $r=0.75$ ）が認められたことから、地域（サイトの違い）やサイト内の空間分布（チャンバーの位置）に係わらず、年積算微生物呼吸量（ R_h , $\text{kgC m}^{-2} \text{y}^{-1}$ ）は土壌有機炭素の蓄積量（SOC, kgC m^{-2} ）と $\Delta^{14}\text{C}$ 値（‰）の関数として以下の式によって推定できることが明らかになった。

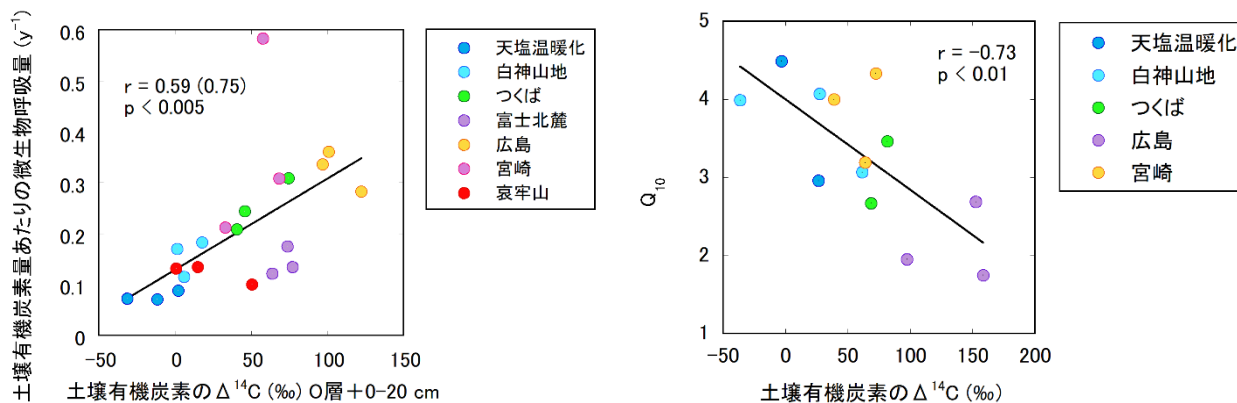


図-2.7. 土壌有機炭素量あたりの年間微生物呼吸量と土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値との関係（左図）、及び土壌深さごとの有機炭素分解の温度依存性（ Q_{10} ）と土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値との関係（右図）

$$R_h = (0.1292 + 0.0018 \times \Delta^{14}\text{C}) \times \text{SOC} \quad (4)$$

さらに、土壌培養実験によって評価した土壌有機炭素分解の温度依存性（ Q_{10} ）と土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値（‰）の間にも有意な負の相関関係（ $r=-0.73$, $p<0.01$, 図-2.7右）を見出すことに成功した。この結果から、土壌有機炭素の微生物分解の温度応答もまた、土壌有機炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ 値に基づいて以下の式によって推定できることが明らかになった。

$$Q_{10} = 3.999 - 0.012 \times \Delta^{14}\text{C} \quad (5)$$

以上のことから、任意の森林土壌における年間微生物呼吸量とその温暖化応答は、土壌有機炭素の蓄積量（SOC）と $\Delta^{14}\text{C}$ 値に基づいて以下の式によって推定・予測できることになる。

$$R_h = (0.1292 + 0.0018 \times \Delta^{14}\text{C}) \times \text{SOC} \times (3.999 - 0.012 \times \Delta^{14}\text{C})^{\Delta T/10} \quad (6)$$

ここで、 ΔT は現在の温度を基準とした将来の温度増加（℃）である。本モデルは、土壌有機炭素の蓄積量と $\Delta^{14}\text{C}$ を分析するだけで、長期にわたる微生物呼吸速度の連続観測等を行うことなく、その土壌における年間の微生物呼吸量とその将来予測が可能になることを示しており、微生物呼吸の広域評価及び将来予測の高精度化に大きく貢献するものであると期待できる。ただし、温暖化に伴う気温以外の環境要因の変化が微生物呼吸に及ぼす影響とそのモデル化については、今後検討していく必要がある。

(4.2.2) 土壌 CH_4 フラックスの空間変動を規定する土壌環境要因の解明

森林土壌におけるメタン吸収を正確に評価することは、地球温暖化の将来を予測する上で重要な課題である。しかし、森林土壌が有するメタン吸収能の時空間的変動要因については未解明な点が多い。サブテーマ1の長期連続観測結果から、日本の森林土壌における CH_4 フラックスは世界の平均の2~3倍に相当し、黒ボク土における吸収速度が他の土壌タイプと比較して大きい傾向があることが明らかになってきている。そこで本研究では、まず国内外7つのチャンバー観測ネットワークサイトを対象に、黒ボク土において特徴的な土壌環境・鉱物特性に着目して、それらの特性とメタン吸収量との関連性を解析した。その結果、土壌の通気性の指標となりうるバルク密度が小さい（通気性が高い）ほど、年間メタン吸収量が大きくなる傾向が見られた（図-2.8左）。さらに、黒ボク特徴の指標として用いられる非晶質鉱物含有量（ $\text{Alo}+0.5\text{Feo}$ 値, $\text{g kg}^{-1}\text{-dry soil}$ ）と年間メタン吸収量との間に有意な負の相関関係（ $r=-0.86$, $p<0.0001$,

図-2.8右)があることを世界で初めて発見した。この関係から、年間メタン吸収量 (F_{CH_4} , $kgCH_4 ha^{-1} y^{-1}$, 負の値が吸収を表す) は以下の式によって推定できる。

$$F_{CH_4} = -2.46 - 0.67 \times [Alo + 0.5Feo] \quad (7)$$

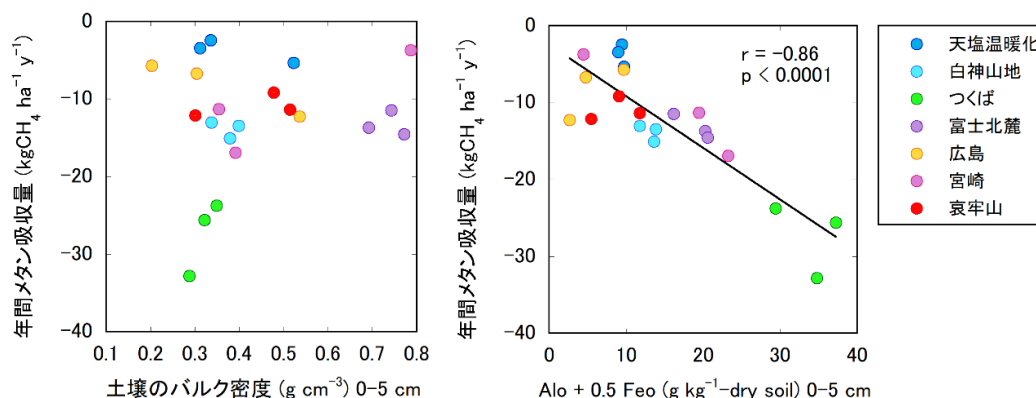


図-2.8. 年間メタン吸収量と土壌のバルク密度（左図）及び非晶質鉱物含有量（右図）との関係

この結果は、表層土壌の非晶質鉱物含有量はメタン吸収量の地域差やサイト内空間分布を説明するキーパラメーターとなることを示しており、土壌鉱物特性に基づいてメタン吸収量を推定できる可能性を示すものである。また、この結果は、火山灰の影響を強く受けた土壌（とりわけ黒ボク土）では、好気的な環境になりやすく、ガス拡散や微生物活性が大きくなることで土壌表層におけるメタン酸化が促進され、 CH_4 フラックスが大きくなるというメカニズムを支持するものである。

また、上述の土壌物理・化学特性に加え、メタンの分解者であるメタン酸化細菌およびメタンを生成するメタン生成古細菌について、土壌単位重量当たりの量と土壌 CH_4 フラックスとの関係の評価した。その際、土壌微生物量の季節変動を考慮し、土壌 CH_4 フラックスについては年平均、および土壌採取日を起点とした6ヶ月（52週間）、3ヶ月（24週間）、1ヶ月（12週間）および2週間平均値を用いた。

メタン酸化細菌量、メタン生成古細菌量およびメタン酸化細菌量とメタン生成古細菌量との差分と各期間平均土壌 CH_4 フラックスとの関係の評価した結果、メタン生成古細菌量についてはすべての期間平均土壌 CH_4 フラックスとの間に有意な関係がみられなかったのに対し、メタン酸化細菌量およびメタン酸化細菌量とメタン生成古細菌量との差分との間には比較的強い関係がみられた（図-2.9）。また、メタン酸化細菌量およびメタン酸化細菌量とメタン生成古細菌量との差分についても、土壌 CH_4 フラックスの年平均との間には有意な関係はみられず、2週間から3ヶ月（12週間）までの期間平均土壌 CH_4 フラックスとの間に比較的強い関係がみられた。

こうした結果は土壌微生物量の高い季節変動性を反映したもので、メタン酸化細菌量やメタン生成

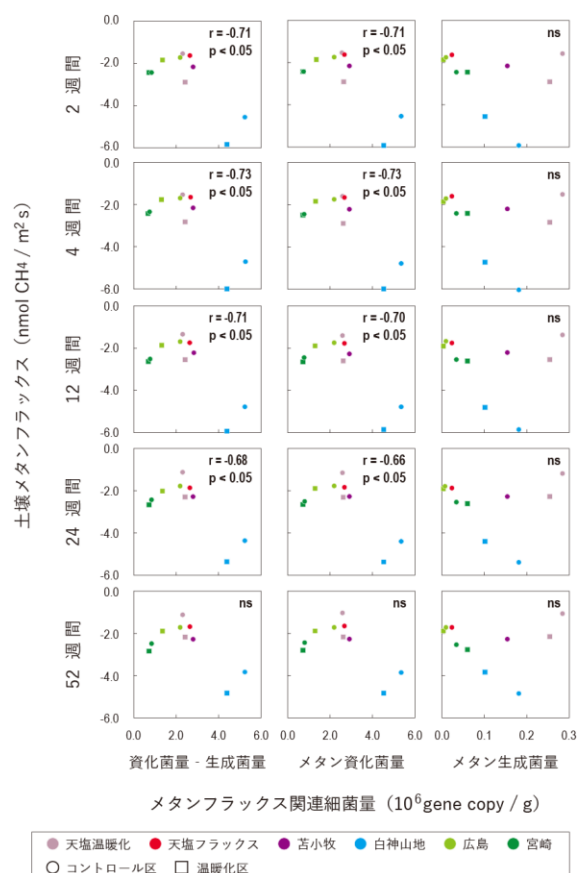


図-2.9. メタン酸化細菌量、メタン生成古細菌量およびメタン酸化細菌量とメタン生成古細菌量との差分と各期間平均土壌メタン吸収速度との関係

古細菌量は2週間から3ヶ月程度の短期の土壌CH₄フラックスの推定に有効なパラメーターとなることが明らかとなった。

(4.3) 土壌炭素フラックスの広域推定

(4.3.1) 土壌CO₂フラックスの広域推定

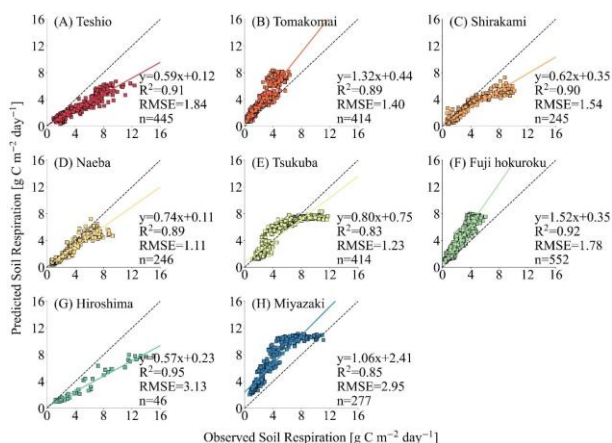


図-2.10. 本研究で構築したモデルによるサイト毎の土壌呼吸量の再現性評価

本研究で採用した説明変数の組み合わせでのモデル結果を図-2.10に示す。この結果はサイト名に記載されたサイト以外のサイトのデータを利用してモデルを構築した際の対象サイトの再現性を示すものであり、モデルの空間的な外挿の能力を評価することとなる。概ね各サイトの土壌呼吸量を再現できている ($R^2=0.83\sim0.95$) が、いくつかのサイトで観測結果を十分に再現できていないサイトも存在する。例えば、天塩や広島サイトではモデルが過小評価する傾向にあること、つくばや宮崎サイトでは、高い土壌呼吸量の領域がモデルで再現できていない、といった欠点もある。

次に構築したモデルで推定した日本における土壌呼吸量の空間分布を示す (図-2.11)。本推定では1 kmの空間分布での推定を行ったことで、地形 (もしくは温度) に強く影響される空間分布を得ることができた。また、日本における土壌呼吸量は $1196.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 、 $441.2 \text{ Tg C year}^{-1}$ と推定できた。同時にモンスーンアジアに拡張した推定結果を図-2.15に示す。本解析では今回試行した広域モンスーンアジア域に対する観測データのカバレッジが十分ではないが、その状況において、CO₂フラックスの推定の試行を行うことはできた。今後はこの解析の信頼性を向上させるため、観測網をさらに拡充し、より多くの観測データを取り込むことにより、推定結果の改善が期待できる。

さらに、本研究の土壌呼吸量の推定結果と他の推定結果を比較すると、本研究では他の研究全般に比較して推定値が高めであることが分かった (図-2.12)。その一方で既存の推定結果は、

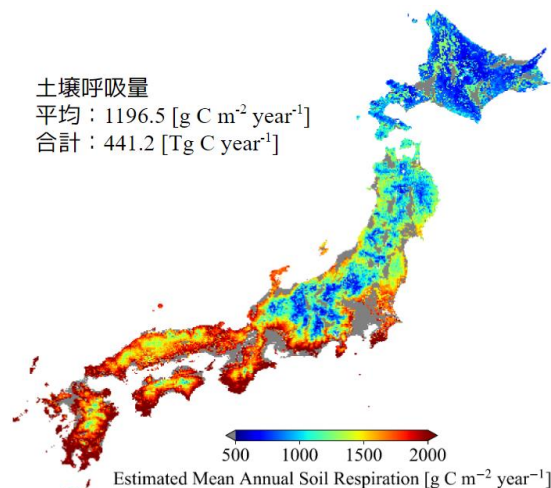


図-2.11. 本研究で推定した日本域の年間土壌呼吸量の空間分布 (2006-2018年の平均値)

本研究で採用した説明変数の組み合わせでの

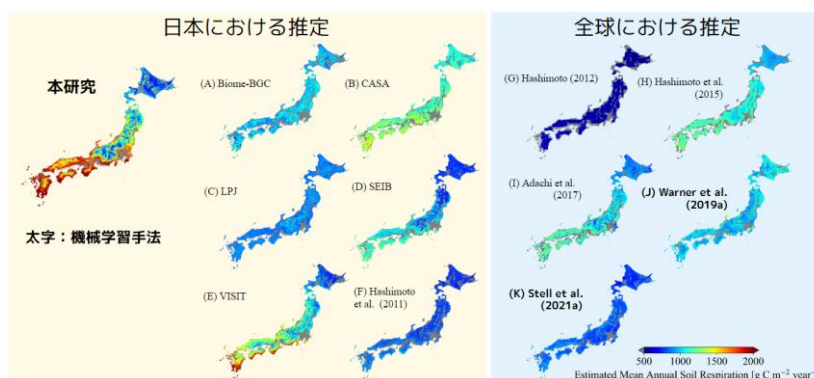


図-2.12. 本研究で推定した日本域の年間土壌呼吸量と他研究での推定結果との比較。日本における推定の比較の(A)～(E)は生態系プロセスモデルの相互比較(Japan-MIPプロジェクト; Ichii et al. 2010; Ito et al. 2010)による結果、(F)～(K)は土壌呼吸データを用いた半経験モデル (細字) もしくは機械学習モデル (太字) による結果。

非常に大きな不確実性を含むことも明らかとなった。既存の推定のうち、図-2.12 (G)~(K)については、世界の観測ネットワークであるSRDB(Jian et al. 2021)を基盤とした推定結果であり、日本などの比較的狭い領域の推定には不向きであると考えられる。また、世界のデータベースでは欧米に観測地点が偏っており、モンスーンアジア地域の推定に関しては大きな不確実性を含むことが考えられる。日本域を対象とした推定結果図-2.12 (A)~(F)については、(A)~(E)に関してはすべてプロセスベースの陸域生態系モデルの結果であり、各モデルの土壌呼吸の推定には大きな不確実性があることが示唆される。従って、本研究で構築した土壌呼吸量のマップは、これらの生態系モデルの検証、もしくは相互比較データセットをして利用することで、プロセスモデルの改善への利用が期待できる。

(4.3.2) 土壌CH₄フラックスの広域推定

土壌CO₂フラックスと同様のアプローチで推定した結果を図-2.13に示す。本モデルでは、現地観測による気象観測データを用いたモデルであり、土壌CO₂フラックスに比較して、再現性(外挿能力)が劣ることが分かった。CH₄フラックスについては、CO₂フラックスに比較して、サイト毎の特徴に影響を受けやすいために、気象条件に加えて、他の観測パラメーターを考慮する必要があるだろう。

土壌CH₄フラックスを決定する要因の一つとして、黒ボク特徴の指標と

して用いられる非品質鉱物含有量(Alo+0.5Feo値, g kg⁻¹-dry soil)がある。この観測はサイト観測に限られてはいるもののCH₄フラックスの推定に対する重要性を評価した。ランダムフォレスト回帰において説明変数の重要性を表す指標として特徴量の重要度がある。ランダムフォレスト回帰によってCO₂フラックスとCH₄フラックスを推定した際のモデルの特徴の比較を図-2.14に示す。土壌CO₂フラックスの推定においては、Alo+0.5Feo値を入力にした場合でもその重要性は高くはなかった。一方、CH₄フラックスの推定においては、Alo+0.5Feo値の重要性が高く、CH₄フラックスの推定においては、Alo+0.5Feo値が重要な役割を果たすことが明らかとなった。このパラメーターは現状では広域で得ることができないため、広域推定にあたっては代替パラメーターの模索などが必要である。

最後に土壌CH₄フラックスの広域推定結果を図-2.15に示す。本研究では、説明変数として、地表面温度、植生指数(2種類)、葉面積指数を用いた。現状では1 kmの空間分解能で8日毎の時間解像度での推定が可能となっており、今後はさらなる評価や実際に構築したデータの活用が望まれる。また地表面温度

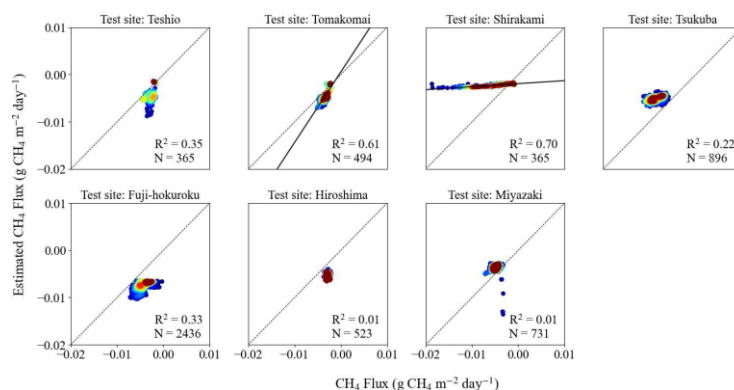
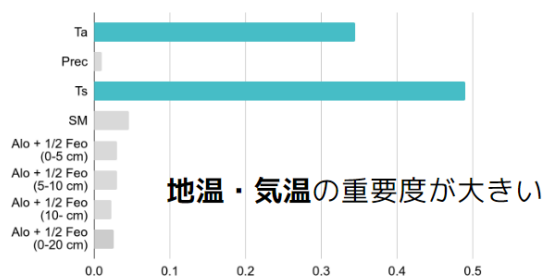


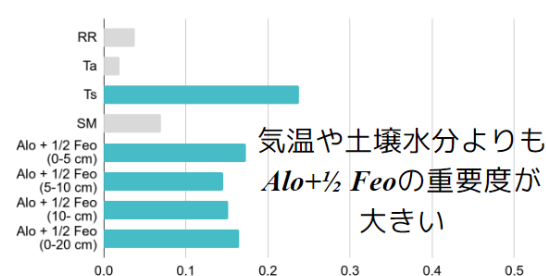
図-2.13. 土壌呼吸量(CO₂)と同様のアプローチで推定したサイト毎の土壌メタン吸収速度。

気象データ+Alo+1/2 Feoで 土壌呼吸量を推定した場合の特徴量の重要度



地温・気温の重要度が大きい

根呼吸+気象データ+Alo+1/2 Feoで メタンを推定した場合の特徴量の重要度



気温や土壌水分よりも
Alo+1/2 Feoの重要度が
大きい

図-2.14. 土壌呼吸量(CO₂)と同様のアプローチで推定したサイト毎の土壌メタン吸収速度。

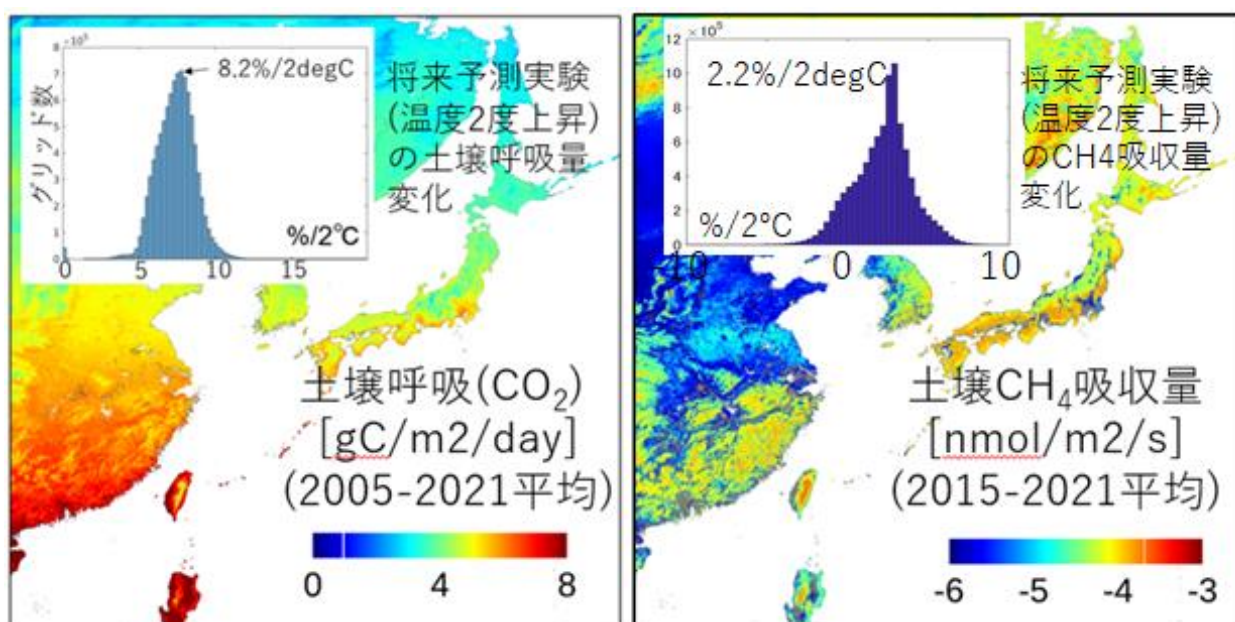


図-2. 15. 本研究で推定したモンスーンアジア域における年間土壌CO₂とCH₄フラックスの空間分布と、温暖化実験（地表面温度2度上昇）におけるCO₂フラックスの変化(%/2°C)。

を2°C上昇させた仮想実験（温暖化実験）では、アジアモンスーン域では土壌CH₄吸収量は増加する傾向を見せ平均で2.2±1.9 % / 2°Cの増加となった。

5. 研究目標の達成状況

チャンパー観測ネットワークサイトにおける土壌微生物特性や土壌¹⁴C、土壌呼吸¹⁴Cなどの分析を通して、土壌CH₄/CO₂フラックスやその温暖化応答に関する多くの重要かつ新しい科学的知見を得るとともに（1-5）、サブテーマ1及び2の観測・分析結果を活用して、土壌CH₄/CO₂フラックスの広域推定・将来予測に関する成果（6-8）を得るなど、目標を上回る成果をあげた。

- 1) 日本の土壌の豊富な有機物蓄積が、温暖化効果が長期にわたり持続する主要因となっているが、温暖化によって分解放出される有機炭素の年代は土壌によって異なる。
- 2) 温暖化に伴う土壌の乾燥は、好気性細菌であるメタン酸化細菌の増加と偏性嫌気性細菌であるメタン生成古細菌の減少をもたらすことでメタン吸収量を大幅に増加させる。
- 3) 土壌有機炭素の¹⁴Cは、微生物呼吸の地域差や空間変動を説明できる有力なパラメーターとなるのみならず、微生物呼吸の温度応答を推定するための指標としても利用できる。
- 4) 土壌微生物量は高い季節性があり、2週間から3ヶ月程度の短期の土壌CH₄フラックスの推定に有効なパラメーターとなる。
- 5) 土壌の非晶質鉱物含有量が高いほど土壌CH₄吸収量が大きくなることを初めて見出し、火山灰の影響を強く受けた土壌においてCH₄フラックスが大きくなるという仮説を立証した。
- 6) 土壌特性データに基づいた土壌CH₄/CO₂フラックス推定式を構築した。
- 7) モンスーンアジア域における土壌呼吸量の空間分布及び温暖化応答を、従来報告をはるかに上回る空間分解能で推定した。
- 8) モンスーンアジア域における土壌CH₄フラックスの広域評価及び将来予測を初めて実現した。

6. 引用文献

- 1) M.ATARASHI-ANDOH, J. KOARASHI, S. ISHIZUKA, K. HIRAI: Agric. For. Meteorol.,152, 149-158 (2012), Seasonal patterns and control factors of CO₂ effluxes from surface litter, soil organic carbon, and root-derived carbon estimated using radiocarbon signatures.

- 2) A. IMAYA, Y. INAGAKI, N. TANAKA and S. OHTA: *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 621-633 (2007), Free oxides and short-range ordered mineral properties of brown forest soils developed from different parent materials in the submontane zone of the Kanto and Chubu districts, Japan.
- 3) J. KOARASHI, M. ATARASHI-ANDOH, S. ISHIZUKA, S. MIURA, T. SAITO and K. HIRAI: *Glob. Change Biol.*, 15, 631-642 (2009), Quantitative aspects of heterogeneity in soil organic matter dynamics in a cool-temperate Japanese beech forest: a radiocarbon-based approach.
- 4) R. T. CONANT, R. A. DRIJBER, M. L. HADDIX, W. J. PARTON, E. A. PAUL, A. F. PLANTE, J. SIX and J. MEGAN STEINWEG: *Glob. Change Biol.*, 14, 868-877 (2008), Sensitivity of organic matter decomposition to warming varies with its quality.
- 5) K. ICHII, M. UEYAMA, M. KONDO et al.: *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, 122, 767-795 (2017), New data-driven estimation of terrestrial CO₂ fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression.
- 6) K. ICHII, T. SUZUKI, T. KATO et al.: *Biogeosciences*, 7, 2061-2080 (2010), Multi-model analysis of terrestrial carbon cycles in Japan: Limitations and implications of model calibration using eddy flux observations.
- 7) A. ITO, K. ICHII, T. KATO: *Ecological Research*, 25, 1033-1044 (2010), Spatial and temporal patterns of soil respiration over the Japanese Archipelago: A model intercomparison study.
- 8) S. HASHIMOTO, T. MORISHITA, T. SAKATA, and S. ISHIZUKA: *Scientific Reports*, 1, 116 (2011) Increasing trends of soil greenhouse gas fluxes in Japanese forests from 1980 to 2009.
- 9) S. HASHIMOTO: *PLoS ONE*, 7, e41962. (2012), Increasing trends of soil greenhouse gas fluxes in Japanese forests from 1980 to 2009.
- 10) S. HASHIMOTO, N. CARVALHAIS, A. ITO, M. MIGLIAVACCA, K. NISHINA, M. REICHSTEIN: *Biogeosciences*, 12, 4121-4132 (2015), Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database.
- 11) M. ADACHI, A. ITO, S. YONEMURA, and W. TAKEUCHI: *Journal of Environmental Management*, 200, 97-104 (2017), Estimation of global soil respiration by accounting for land-use changes derived from remote sensing data.
- 12) D.L. WARNER, B. BOND-LAMBERTY, J. JIAN, E. STELL, R. VARGAS: *Global Biogeochemical Cycles*, 33, 1733-1745 (2019) Spatial Predictions and Associated Uncertainty of Annual Soil Respiration at the Global Scale.
- 13) E. STELL, D. WARNER, J. JIAN, B. BOND-LANBERTY, and R. VARGAS: *Global Change Biology*, 27, 3923-3938 (2021) Spatial biases of information influence global estimates of soil respiration: How can we improve global predictions?
- 14) J. JIAN, R. VARGAS, K. ANDERSON-TEIXEIRA et al.: *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 255–267 (2021) A restructured and updated global soil respiration database (SRDB-V5)

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) X. ZHAO, N. LIANG, J. ZENG, A. MOHTI: Soil Biol. Biochem, 152, 108067 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108067> (IF: 8.546)
A simple model for partitioning forest soil respiration based on root allometry.
- 2) L. SHA, M. TERAMOTO, N. NOH, S. HASHIMOTO, M. YANG, M. SANWANGSRI, N. LIANG: Journal of Agricultural Meteorology, 77, 24–51 (2021), <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-20-00013> (IF: 1.375)
Soil carbon flux research in the Asian region: Review and future perspectives.
- 3) R. CUI, T. HIRANO, L. SUN, M. TERAMOTO, N. LIANG: J. Agric. Meteorol, 77(3), (2021), <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-20-00049> (IF: 1.375)
Variations in biomass, production and respiration of fine roots in a young larch forest.
- 4) 平野高司 (2021), 地球環境, 26, 57-68
「森林生態系における炭素循環観測」 (総説)
- 5) M. TERAMOTO, T. HAMAMOTO, N. LIANG, T. TANIGUCHI, T.Y. ITO, R. HU, N. YAMANAKA: Sci. Rep. 12, 14320 (2022), <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17787-8> (IF: 4.996)
Abiotic and biotic factors controlling the dynamics of soil respiration in a coastal dune ecosystem in western Japan.
- 6) T. HIRANO, R. CUI, L. SUN, M. TERAMOTO, N. LIANG: Plant Soil (2023) 482:57–72. (2023), <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05674-0> (IF: 5.440)
Partitioning of root respiration into growth, maintenance, and ion uptake components in a young larch-dominated forest.
- 7) T. LI, H. F. CHENG, Y. LI, Z. MOU, X. ZHU, W. WU, J. ZHANG, L. KUANG, J. WANG, D. HUI, H. LAMBERS, J. SARDANS, J. PEÑUELAS, H. REN, A. B. MOHTI, N. LIANG, Z. LIU: Science of The Total Environment 881 (2023) 163204. (2023) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163204> (IF: 10.754)
Divergent accumulation of amino sugars and lignins mediated by soil functional carbon pools under tropical forest conversion.

【サブテーマ2】

- 1) J. ZHANG, L. KUANG, Z. MOU, T. KONDO, J. KOARASHI, M. ATARASHI-ANDOH, Y. LI, X. TANG, Y. -P. WANG, J. PENUELAS, J. SARDANS, D. HUI, H. LAMBERS, W. WU, J. KAAL, J. LI, N. LIANG AND Z. LIU: Plant Soil, 1573-5036 (2022), <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05642-8> (IF: 5.440)
Ten years of warming increased plant-derived carbon accumulation in an East Asian monsoon forest.

<査読付き論文に準ずる成果発表>

サブテーマ1、サブテーマ2とも、特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表 (査読なし) >

【サブテーマ1】

- 1) 伊豆田 猛 編：大気環境と植物、朝倉書店、122-129 (2020)
「4.4 章 森林生態系に対する温暖化の影響」 (執筆担当：高木健太郎)
- 2) R. HATANO, H. SHINJO and Y. TAKATA (Eds): The soils of Japan, Springer Singapore, 135-184 (2021)
“Hokkaido Region” (T. Nakatsuji et al.)

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 阿部 有希子、梁 乃申、小嵐 淳、安藤 麻里子、寺本 宗正、橋本 昌司、丹下 健：日本地球惑星科学連合2020年大会 (2020)
「スギ人工林における土壌呼吸速度の7年間の変化」
- 2) 寺本 宗正、梁 乃申、曾 継業、小嵐 淳、近藤 俊明、安藤 麻里子、荒巻 能史、趙 昕：日本地球惑星科学連合2020年大会 (2020)
「つくばアカマツ林における土壌炭素フラックスに対する長期的な温暖化の影響」
- 3) 梁 乃申、寺本 宗正、高木 健太郎、近藤 俊明、小嵐 淳、安藤 麻里子、平野 高司、高橋 善幸、高木 正博、石田 祐宣、荒巻 能史、Y. ZHANG、D. LAI、P-N. CHIANG、曾 継業、S. PIAO、S. LI、趙 昕、市井 和仁、山貫 緋称、M. AZIAN：第 68 回日本生態学会大会 (2021)
「メタン吸収能を考慮したアジア域の森林における土壌炭素動態の統括的観測」
- 4) 高木 正博、孫 力飛、梁 乃申：第 68 回日本生態学会大会 (2021)
「南九州地方の森林土壌における炭素放出とメタン吸収」
- 5) 寺本 宗正、近藤 俊明、梁 乃申、小嵐 淳、安藤 麻里子、曾 継業、孫 力飛、中根 周歩、荒巻 能史：第 68 回日本生態学会大会 (2021)
「西日本常緑カシ林土壌における二酸化炭素排出とメタン吸収に対する温暖化影響」
- 6) 孫 力飛、平野 高司、梁 乃申、寺本 宗正、矢崎 友嗣、高木 健太郎、石田 祐宣、高木 正博、近藤 俊明、小嵐 淳、安藤 麻里子：第 68 回日本生態学会大会 (2021)
「大型チャンバーを用いた大規模攪乱後の冷温帯林における炭素動態の長期評価」
- 7) 阿部 有希子、梁 乃申、寺本 宗正、丹下 健：第 132 回日本森林学会大会 (2021)
「スギ人工林における皆伐前と皆伐後2年間の土壌呼吸速度と土壌有機物の変化」
- 8) 孫 力飛、梁 乃申、平野 高司、高橋 善幸、寺本 宗正、高木 健太郎、近藤 俊明、小嵐 淳、安藤 麻里子、井手 玲子、趙 昕、石田 祐宣、高木 正博、矢崎 友嗣：日本地球惑星科学連合2021年大会 (2021)
「日本の二つの冷温帯林における土壌CO₂/CH₄フラックスの時間と空間変動特性」
- 9) 中村瑠莉、寺本宗正、山中典和、梁乃申、ホルチャ：日本農業気象学会中国四国支部大会 (2021)
「海岸砂丘における土壌呼吸への水分影響」
- 10) 坂口香帆・平野高司・崔鋭、孫力飛・梁乃申：日本農業気象学会2021年北海道支部大会，オンライン
「二次遷移中の落葉樹林における土壌呼吸の時空間変動に関する要因解析」
- 11) R. CUI, T. HIRANO, L. SUN, M. TERAMOTO and N. LIANG：International Symposium on Agricultural Meteorology, Sapporo, Japan, 2021
“Dynamics of soil respiration in a young larch plantation”
- 12) R. Cui, T. Hirano, L. Sun, M. Teramoto, N. Liang: International Symposium on Agricultural Meteorology 2021, online, 2021
“Spatiotemporal variation in biomass, production and respiration of fine roots in a young larch forest”
- 13) K. TAKAGI, L. SUN, M. TERAMOTO, T. KONDO, J. KOARASHI, M. ATARASHI-ANDOH, K. ICHII, N. LIANG：International Symposium on Agricultural Meteorology, Sapporo, Japan, 2021
“Soil warming effect on the heterotrophic respiration and soil CH₄ flux in a cool-temperate forested peatland”
- 14) S. ISHIDA, M. TODA, T. SAITO, Y. IGARI, D. ITO：The 9th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management, Chiang Rai, Thailand, 2021
“Green chromatic coordinate (GCC) affects CO₂ budget in beech forest”
- 15) 坂口香帆・平野高司・崔鋭、孫力飛・梁乃申：日本農業気象学会2022年全国大会，オンライン
「機械学習を用いた土壌呼吸の分離に関する研究」
- 16) 阿部有希子、梁乃申、小嵐淳、安藤麻里子、橋本昌司、丹下健：日本土壌肥料学会 2022 年度東京大会 (2022)

「火山灰土壌のスギ人工林における土壌呼吸速度の空間的なばらつきとその要因」

- 17) 高木正博他 第78回九州森林学会 (2022)
「九州・沖縄地方における森林土壌のメタンフラックスと理化学性の関係」
- 18) 中村瑠莉、寺本宗正、山中典和、梁乃申、伊藤健彦、ホルチャ：第69回日本生態学会大会 (2022)
「海岸砂丘における CO₂フラックスの時空間変動」
- 19) 高木健太郎、平野高司、孫力飛、梁乃申、高橋善幸、寺本宗正、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、石田祐宣、高木正博、市井和仁：第69回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」 (2022)
「地温上昇処理が冷温帯植林泥炭地のメタン吸収量に与える影響」
- 20) 高橋善幸、孫力飛、梁乃申、寺本宗正、高木健太郎、平野高司、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、高木正博、石田祐宣、市井和仁：第69回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」 (2022)
「火山灰土壌に立地するカラマツ林土壌でのメタン等微量ガス成分の交換量の変動解析」
- 21) 平野高司、坂口香帆、山下隼平、崔鋭、胡睿、孫力飛、梁乃申、寺本宗正、高木健太郎、石田祐宣、安藤麻里子、小嵐淳、高木正博、近藤俊明、市井和仁、高橋善幸：第69回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」 (2022)
「台風攪乱後の若齢落葉樹林における土壌メタンフラックスの時空間変動」
- 22) 石田祐宣、孫力飛、梁乃申、寺本宗正、平野高司、高木健太郎、高木正博、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、市井和仁、高橋善幸：第69回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」 (2022)
「白神山地の広葉樹林における土壌メタンフラックスの特性」
- 23) 孫力飛、梁乃申、高橋善幸、寺本宗正、平野高司、高木健太郎、石田祐宣、高木正博、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子：第69回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」 (2022)
「異なる森林生態系における土壌メタン吸収の時空間変動に及ぼす環境要因」
- 24) 高木正博、孫力飛、梁乃申、寺本宗正、平野高司、高木健太郎、石田祐宣、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、市井和仁、高橋善幸：第69回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」 (2022)
「九州・沖縄地方における森林土壌のメタンフラックスと化学性の関係」
- 25) 梁乃申、寺本宗正、高木健太郎、平野高司、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、高木正博、石田祐宣、Yiping ZHANG、YF Derrick LAI、Po-Neng CHIANG、市井和仁、山貫緋称、孫力飛、高橋善幸、曾継業、Mohti AZIAN：第69回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」 (2022)
「日本を中心としたアジア域の森林における土壌メタン吸収の過去、現状と将来」
- 26) R. Hu, S. Yamashita, K. Sakaguchi, R. Cui, T. Hirano, L. Sun, N. Liang: International Symposium on Agricultural Meteorology 2022, online, 2022
“Spatiotemporal variation in soil methane uptake in a regrowing deciduous forest in northern Japan”
- 27) L. Sun, N. Liang, K. Takagi, S. Ishida, M. Takagi, M. Teramoto, T. Kondo, J. Koarashi, M. Atarashi-Andoh, J. Zeng, T. Hirano, Y. Takahashi : JpGU Meeting 2022, Chiba, Japan, 2022
“Impacts of experiment warming on soil CO₂ emissions and CH₄ uptake in Japanese forests”
- 28) M. Teramoto, N. Liang, L. Sun, T. Kondo, J. Koarashi, M. Atarashi-Andoh, M. Takagi, N. Yamanaka, T. Hirano, K. Takagi, S. Ishida, K. Ichii, Y. Takahashi, R. Hu : JpGU Meeting, Chiba, Japan, 2022
“Factors of spatial variation in soil CH₄ uptake rate in forests in Western Honshu”
- 29) K. Sakaguchi, T. Hirano, R. Cui, L. Sun, N. Liang: AsiaFlux Conference 2022, Kuching, Malaysia, 2022
“Separation of soil respiration into its components and analysis of spatiotemporal variability using Random Forest in Japanese northern forests”

- 30) R. Hu, T. Hirano, K. Sakaguchi, S. Yamashita, R. Cui, L. Sun, N. Liang: AsiaFlux Conference 2022, Kuching, Malaysia, 2022
“Controls On Soil Methane Flux Measured With an Automated Chamber System”
- 31) L. Sun, N. Liang, Y. Takahashi, T. Hirano, S. Ishida, M. Takagi, K. Takagi, M. Teramoto, T. Kondo, J. Koarashi, M. Atarashi-Andoh: AsiaFlux Conference 2022, Kuching, Malaysia, 2022
“Driven of Tempo-Spatial Variations of Forest Soil Methane Uptake by Root Activity”
- 32) N. Liang: AsiaFlux Conference 2022, Kuching, Malaysia, 2022 (基調講演)
“Increasing Challenges and Opportunities for Flux Communities in a Changing World”
- 33) N. Liang, T. Kondo, K. Takagi, T. Hirano, S. Ishida, M. Teramoto, M. Takagi, J. Koarashi, M. Atarashi-Andoh, Y. Zhang, P. Chiang, D. Lai, L. Sun, J. Zeng, Y. Takahashi, K. Ichii, M. Azian: AsiaFlux Conference 2022, Kuching, Malaysia, 2022 (Keynote)
“CH₄ Uptake of Asian Forest Soils in the Past, Present and Future”
- 34) N. Liang: The 18th U.S.-China Carbon Consortium (USCCC) Annual Workshop, October 28-30, 2022, Wuhan, China (invited)
“Soil CH₄ Uptake of Asian Forests ~ the Past, Present and Future ~”
- 35) R. Hu, T. Hirano, K. Sakaguchi, L. Sun, N. Liang: International Symposium on Agricultural Meteorology 2022, Yamaguchi, 2022
“Effects of fine roots existence on soil methane uptake”
- 36) 馬 鋭麒、高木健太郎、平野高司、孫力飛、梁乃申、高橋善幸、寺本宗正、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、石田祐宣、高木正博、市井和仁：日本農業気象学会2023年全国大会（2023）
「長期温暖化実験による北海道最北の森林泥炭地における三年間の土壌CO₂とCH₄フラックスの変化」
- 37) 林夏帆、高木健太郎、梁乃申、上田実希、岡田慶一、森章：第70回日本生態学会全国大会（2023）
「落葉リター分解における温暖化と植物種多様性の効果、ポスター賞」
- 38) 孫力飛、梁乃申、高橋善幸、平野高司、高木健太郎、寺本宗正、石田祐宣、高木正博、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、曾継業：第70回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」（2023）
「黒ボク森林土壌における長期観測によるメタン吸収動態の解明及び地球温暖化への応答」
- 39) 高木正博、寺本宗正、近藤俊明、梁乃申、小嵐淳、安藤麻里子、孫力飛、高木健太郎、石田祐宣：第70回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」（2023）
「森林土壌のメタンフラックスと土壌の物理・化学性の関係」
- 40) 梁乃申、高木健太郎、平野高司、石田祐宣、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、寺本宗正、高木正博、市井和仁、山貫緋称、ZHANGYiping、LAIDerrick Y.F.、CHIANGPo-Neng、孫力飛、高橋善幸、曾継業、MOHTIAzian：第70回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」（2023）
「モンスーンアジア域における土壌温室効果ガスフラックスに関する研究の課題と展望」
- 41) 阿部有希子、中山理智、丹下健、安藤麻里子、小嵐淳：第 134 回日本森林学会大会（2023）「森林土壌の母材の違いが下層土壌の微生物呼吸量に与える影響」
- 42) 石田祐宣、石川輝、孫力飛、梁乃申、寺本宗正、平野高司、高木健太郎、高木正博、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、市井和仁、高橋善幸：日本農業気象学会2023年全国大会（2023）
「白神山地の森林土壌におけるメタンフラックスの乾燥年と湿潤年の比較」M. TERAMOTO, N.
- 43) ZORIGBAATAR, U. JAMSRAN, N. LIANG, N. YAMANAKA：International Symposium on Agricultural Meteorology 2023, Yamaguchi, Japan, 2023
“Influence of grazing on soil respiration in grassland ecosystems in Mongolia”

【サブテーマ 2】

- 1) H. YAMANUKI, K. ICHII, N. LIANG, M. TERAMOTO, J. ZENG, K. TAKAGI, T. HIRANO, S. ISHIDA, M. NARAMOTO, T. KONDO, K. NAKANE, M. TAKAGI : JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Online, 2020
“Data-driven estimation of soil respiration in Japan”
- 2) 永野 博彦、田中 草太、安藤 麻里子、小嵐 淳：日本地球惑星科学連合 2020 年大会（2020）
“Soil organic carbon and its water-extractable fraction in volcanic ash soils in a Japanese temperate forest : relations to phosphate absorption coefficient and their implication”
- 3) 近藤 俊明、寺本 宗正、高木 健太郎、小嵐 淳、安藤 麻里子、市井 和仁、高木 正博、石田 祐宣、山貫 緋称、梁 乃申：第 68 回日本生態学会大会（2021）
「温暖化に対する土壌微生物群集の応答と土壌炭素フラックスへの影響」
- 4) 小嵐 淳、安藤 麻里子、高木 健太郎、近藤 俊明、寺本 宗正、永野 博彦、國分 陽子、高木 正博、石田 祐宣、市井 和仁、山貫 緋称、梁 乃申：第 68 回日本生態学会大会（2021）
「微生物呼吸とその温暖化応答を土壌有機炭素特性から推定できるか？」
- 5) 市井 和仁、山貫 緋称、梁 乃申、寺本 宗正、高橋 善幸、曾 継業、高木 健太郎、平野 高司、石田 祐宣、高木 正博、檜本 正明、中根 周歩、近藤 俊明、小嵐 淳、安藤 麻里子：第 68 回日本生態学会大会（2021）
「日本における土壌呼吸量の広域推定」
- 6) 山貫緋称、市井和仁、山本雄平、小槻峻司、寺本宗正、孫力飛、永野博彦、平野高司、高木健太郎、石田祐宣、高木正博、安立美奈子、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、高橋善幸、梁乃申：日本農業気象学会関東甲信越支部 2022 年度例会（2022）
「日本域におけるデータ駆動型土壌呼吸量広域推定モデルの構築と相互比較」
- 7) 近藤俊明：日本学術会議公開シンポジウム「東南アジアのアブラヤシ農園の持続的開発の問題点と課題」（2022）
「持続的なアブラヤシ農園経営に向けた農作物残渣の利活用技術の開発」
- 8) 永野博彦、田中草太、安藤麻里子、小嵐淳：日本土壌肥料学会 2022 年度東京大会（2022）「風乾土壌から水 抽出した有機物の安定同位体分析による土壌有機物分解動態の推定」
- 9) 鈴木優里、永野博彦、神田裕貴、平舘俊太郎、安藤麻里子、小嵐淳：日本農業気象学会関東甲信越支部 2022 年度例会（2022）
「水分変動増大が土壌の二酸化炭素放出に及ぼす影響：国内6カ所10土壌の培養実験による検証」
- 10) 安藤麻里子、小嵐淳、國分陽子、藤田奈津子、永野博彦、孫力飛、梁乃申、寺本宗正、平野高司、高木健太郎、石田祐宣、高木正博、近藤俊明、市井和仁、高橋善幸：第69回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」（2022）
「日本の森林土壌におけるメタン及び二酸化炭素フラックスの土壌特性との関連性」
- 11) 近藤俊明、寺本宗正、孫力飛、高木健太郎、小嵐淳、安藤麻里子、市井和仁、平野高司、石田祐宣、高木正博、高橋善幸、梁乃申：第69回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」（2022）
「温暖化に対するメタン菌およびメタン資化菌の応答と土壌メタン吸収能への影響」
- 12) 市井和仁、山貫緋称、山本雄平、孫力飛、梁乃申、寺本宗正、永野博彦、平野高司、高木健太郎、石田祐宣、高木正博、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、高橋善幸：第69回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」（2022）
「土壌呼吸量の広域推定と相互比較」
- 13) H. Yamanuki, K. Ichii, Y. Yamamoto, S. Kotsuki, L. Sun, N. Liang, M. Teramoto, H. Nagano, T. Hirano, K. Takagi, S. Ishida, M. Takagi, T. Kondo, J. Koarashi, M. Ando, Y. Takahashi : JpGU 2022 Chiba, Japan, 2022
“Refinement of a model for upscaling of soil respiration in Japan”
- 14) H. NAGANO, M. ATARASHI-ANDOH, S. TANAKA and J. KOARASHI : Japan Geoscience Union Meeting 2022, Chiba, Japan, 2022

“Stable carbon and nitrogen isotopes in water-extractable organic matter from air dried soils to elucidate microbial utilization of substrate organic matter in a Japanese temperate forest”

- 15) H. NAGANO, M. ATARASHI-ANDOH, S. TANAKA, S. HIRADATE, K. FUJII and J. KOARASHI : 8th International Symposium on Soil Organic Matter, Korea ,2022
 “Rewetting dried soils for elucidating SOM dynamics in andic soils of a Japanese temperate forest”
- 16) 小嵐淳、安藤麻里子、梁乃申、近藤俊明、高木健太郎、平野高司、高木正博、石田祐宣、寺本宗正、永野博彦、市井和仁、石塚成宏、平舘俊太郎、伊藤雅之、孫力飛、國分陽子、藤田奈津子：第 70 回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」（2023）
 「放射性炭素で見る土壌炭素動態」
- 17) 近藤 俊明、孫 力飛、小杉 昭彦、Kumar Sudesh, 梁 乃申：第 70 回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」（2023）
 「東南アジアにおけるオイルパーム農園開発が土壌微生物および土壌炭素フラックスに及ぼす影響」
- 18) 山貫緋称、市井和仁、山本雄平、小槻峻司、寺本宗正、孫力飛、永野博彦、平野高司、高木健太郎、石田祐宣、高木正博、安立美奈子、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、高橋善幸、梁乃申：第 70 回日本生態学会全国大会シンポジウム「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ」（2023）
 「土壌呼吸の広域推定の現状」
- 19) 安藤麻里子、小嵐淳、梁乃申、高木健太郎、近藤俊明、平野高司、寺本宗正、高木正博、石田祐宣、市井和仁、孫力飛、國分陽子、藤田奈津子：第 134 回日本森林学会大会(2023)
 「放射性炭素を利用した微生物呼吸の年代とその影響因子の評価」
- 20) 山貫緋称、市井和仁、山本雄平、小槻峻司、寺本宗正、孫力飛、永野博彦、平野高司、高木健太郎、石田祐宣、高木正博、安立美奈子、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、高橋善幸、梁乃申：第 70 回日本生態学会大会「土壌のメタン吸収能および有機炭素動態の把握に向けた多面的アプローチ（2023）」
 「土壌呼吸量の広域推定の現状」
- 21) 永野博彦、鈴木優里、平舘俊太郎、安藤麻里子、小嵐淳：第70回日本生態学会大会（2023）「土壌炭素動態推定手法としての風乾土壌の水抽出有機物」
- 22) 永野博彦、鈴木優里、神田裕貴、平舘俊太郎、安藤麻里子、小嵐淳：日本農業気象学会 2023年 全国大会（2023）
 「水分変動増大がもたらす表層土壌の二酸化炭素放出増大：高温環境における鈍化」
- 23) 鈴木優里、永野博彦、神田裕貴、平舘俊太郎、安藤麻里子、小嵐淳：日本農業気象学会2023年 全国大会（2023）
 「水分変動増大がもたらす表層土壌の二酸化炭素放出増大：規定因子の探索」
- 24) H. Yamanuki, K. Ichii, Y. Yamamoto, M. Teramoto, L. Sun, J. Koarashi, M. Atarashi-Andoh, H. Nagano, T. Hirano, K. Takagi, S. Ishida, M. Takagi, T. Kondo, Y. Takahashi, N. Liang : JpGU Meeting 2023（国内、2023）
 “Effects of soil properties in estimating soil respiration and methane absorption”（アブストラクト提出済み）

（3）「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 2-2006 公開シンポジウム「白神・青森の大地から見えてくる温暖化の将来 ～研究の最前線からの報告～」（主催：独立行政法人環境再生保全機構／環境研究総合推進費課題【2-2006】、2021年3月19日、オンライン、入室者約80名）にて講演
- 2) 梁 乃申、孫 力飛、平野 高司、高木 健太郎、近藤 俊明、市井 和仁、高橋 善幸. 北海道大学苫小牧研究林. (2022) 国立環境研究所 夏の大公開「つくば×観測サイト 生中継ラボツアー」
- 3) NPO 法人青森県環境パートナーシップセンター（石田祐宣 監修）、（一般向け温暖化防止活動講座

の前座用)DVD 動画作成、2022 年、「地球温暖化 白神山地からのメッセージ・SDGs for AOMORI」

(4) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞

特に記載すべき事項はない。

(6) その他の成果発表

特に記載すべき事項はない。

IV. 英文Abstract

Evaluation and Future Prediction of the Effect of Climate Change on Asian Forest Soil Carbon Dynamics Based on a Comprehensive Field Study

Principal Investigator: Naishen LIANG

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)

16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN

Tel: +81-29-850-2774 / Fax: +81-29-850-2960

E-mail: liang@nies.go.jp

Cooperated by: Hokkaido University, Hirosaki University, University of Miyazaki, Tottori University, Chiba University, Japan International Research Center for Agricultural Sciences, Japan Atomic Energy Agency

[Abstract]

Key Words: Methane, Warming experiment, Microbiota, Soil organic carbon, Soil radiocarbon (^{14}C)

Methane (CH_4) is the second most important greenhouse gas after carbon dioxide (CO_2), contributing to human-induced global warming. CH_4 has a Global Warming Potential 86 and 28 times larger than CO_2 for time horizons of 20 and 100 years. The atmospheric concentration of CH_4 is about two and half times higher than pre-industrial levels and is responsible for 11-30% of the rise in global temperature. On Earth, water-unsaturated soils are the only sinks of atmospheric CH_4 due to the presence of methanotrophic bacteria, and the CH_4 sink strengths are high in soils with high porosity but low in soils with high water content. In Japan, about 70% of forest soils are volcanic ash-derived soils characterized by a high porosity and mean annual precipitation (1740 mm) is more than double of that in global land (740 mm). Accordingly, we hypothesized that Japanese forest soils would have high CH_4 uptake potential, but the high potential might be offset by their high-water content, and consequently, their CH_4 uptake rate would be comparable to or even weaker than that of mean of global temperate forest soils. To support this hypothesis, as well as to compare soil CH_4 sink of the Japanese forests with that of other monsoon Asian countries, we have been performing continuous measurement of CO_2 and CH_4 flux, periodically sampling of soil for laboratory analyses of soil physical and chemical properties, methanotrophic bacteria, methanogenic archaea, and soil radiocarbon (^{14}C) at thirteen typical forests distributed from northern Hokkaido to Honshu, Kyushu, Taiwan, Mainland China, Hong Kong, and Peninsular Malaysia.

We found that monsoon Asian forest soil CH_4 uptake rate was significantly higher than that of dataset used for estimation of global methane budget, with 6.4, 2.2 and 1.9 times of that in boreal, temperate, and tropical forests. Soil CH_4 uptake rate of Japanese forests was systematically higher than that of other monsoon Asian countries, probably due to both of high soil organic carbon (SOC) content and volcanic ash-derived soils. Compared to the previous reports for American and European forests, global warming is expected having positive and high effect on both soil CO_2 emission and CH_4 uptake, because the warming effect showed positive correlation with SOC stock as well as soil drought induced by warming treatment. In fact, the increase in the amount of aerobic methanotroph and the decrease in that of anaerobic methanogen in response to soil drought were detected by genetic analyses. We also found that ^{14}C signature of SOC, as an index of soil carbon turnover, can be a key parameter to explain the regional difference and temperature sensitivity of soil CO_2 emission. In addition, soil CH_4 uptake rate is found to be higher in soils with higher contents of acid oxalate extractable aluminum and iron, which supports the high CH_4 absorption capability of volcanic ash-derived soils in Japan.

Based on our database, by using machine learning and process models, we have successfully upscaled our field network observations to the monsoon Asian region. Our high-resolution map with 1km spatial resolution predicts that more CO_2 will be released from the soil to the atmosphere under global warming than we previously expected,

however, the increasing CH_4 sink induced by global warming will offset much portion of the increasing soil CO_2 emission. Our results are expected to contribute to establishing efficient environmental policies for both Paris Agreement and 2050 Carbon Neutral Strategy.